

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Alen Grdić

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Biserka Runje, dipl. ing.

Student:

Alen Grdić

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Biserki Runje i Amaliji Horvatić Novak, mag. ing. mech. na stručnoj pomoći, savjetima i informacijama tijekom izrade ovog rada.

Alen Grdić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu | |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum 07-07-2016 | Prilog |
| Klasa: 602-04/16-6/3 | |
| Ur.broj: 15-1703-16-253 | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

ALEN GRDIĆ

Mat. br.: 0035184726

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**UTJECAJ PRILAGODBE MODELA PODACIMA
DIMENZIONALNIH MJERENJA KOD RAČUNALNE
TOMOGRAFIJE**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**THE IMPACT OF DATA FITTING ON DIMENSIONAL
COMPUTED TOMOGRAPHY MEASUREMENTS**

Opis zadatka:

U radu je potrebno analizirati matematičke postupke kojima se računalnom tomografijom (eng. Computed Tomography – CT) izmjereni oblaci točaka opisuju matematičkim funkcijama. Analizu provesti za industrijski CT oznake XT H 225 koji se nalazi u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina na Katedri za mjerenje i kontrolu Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Također je potrebno eksperimentalno procijeniti utjecaj prilagodbe modela podacima na točnost i preciznost rezultata mjerenja dimenzionalnih i geometrijskih značajki.

U tekstu diplomskog rada potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć pri izradi.

Zadatak zadan:

5. svibnja 2016.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Biserka Runje

Rok predaje rada:

7. srpnja 2016.

Predviđeni datum obrane:

13., 14. i 15. srpnja 2016.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

| | |
|---|------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | IV |
| POPIS OZNAKA | V |
| POPIS KRATICA | VI |
| SAŽETAK..... | VII |
| SUMMARY | VIII |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 1.1. Područja primjene računalne tomografije | 1 |
| 2. OSNOVE RAČUNALNE TOMOGRAFIJE..... | 3 |
| 2.1. Priroda rendgenskih zraka..... | 3 |
| 2.2. Nastanak rendgenske zrake | 4 |
| 2.3. Princip rada | 5 |
| 3. IZVEDBE CT UREĐAJA..... | 6 |
| 3.1. Vrste CT skenera..... | 7 |
| 3.1.1. Translacijski skeneri | 7 |
| 3.1.2. Konusni skeneri | 8 |
| 4. GLAVNE KOMPONENTE CT UREĐAJA..... | 10 |
| 4.1. Hardver..... | 10 |
| 4.1.1. Izvor rendgenskog zračenja | 10 |
| 4.1.2. Detektor..... | 12 |
| 4.1.3. Kinematički sustav | 13 |
| 4.2. Softver..... | 15 |
| 4.2.1. Alati za rekonstrukciju modela i prepoznavanje rubova..... | 15 |
| 4.2.2. Alati za dimenzionalnu analizu..... | 16 |
| 5. MJERNA NESIGURNOST I MJERITELJSKA SLJEDIVOST | 17 |
| 5.1. Meta | 18 |
| 5.2. Snaga izvora zračenja..... | 18 |
| 5.3. Materijal i geometrija predmeta | 19 |
| 5.4. Temperatura | 20 |
| 5.5. Utjecaj mjeritelja..... | 20 |
| 5.6. Ostali utjecaji na mjerenja..... | 20 |
| 5.7. Mjeriteljska sljedivost | 21 |
| 6. PRIMJENA RAČUNALNE TOMOGRAFIJE | 23 |
| 6.1. Prednosti i nedostaci računalne rendgenske tomografije..... | 25 |
| 7. EKSPERIMENTALNI DIO | 27 |
| 7.1. Nikon CT H 225..... | 27 |
| 7.1.1. Korišteni Softver | 29 |

| | |
|--|----|
| 7.2. Metode prilagodbe modela..... | 34 |
| 7.2.1. Gaussova metoda ili kružnica najmanjih kvadrata | 34 |
| 7.2.2. Chebysheva metoda ili metoda najmanje kružne zone | 35 |
| 7.2.3. Metoda najmanje unutarnje zone | 36 |
| 7.2.4. Metoda najmanje vanjske zone | 36 |
| 7.2.5. Metoda najmanje opisane kružnice..... | 37 |
| 7.2.6. Metoda najveće upisane kružnice | 38 |
| 7.3. Dimenzijska analiza | 38 |
| 7.4. Obrada rezultata mjerenja | 40 |
| 7.4.1. Izračun odstupanja | 40 |
| 7.4.2. Analiza varijance..... | 42 |
| 7.4.3. Sustavni pomak..... | 45 |
| 8. ZAKLJUČAK..... | 48 |
| LITERATURA..... | 49 |
| PRILOZI..... | 51 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 1. | Elektromagnetski spektar [4]..... | 3 |
| Slika 2. | Temeljni princip nastanka rendgenske zrake [6]..... | 4 |
| Slika 3. | Otvorena [8] i zatvorena [9] izvedba CT uređaja..... | 6 |
| Slika 4. | Prikaz izvora zračenja i detektora na rotirajućem postolju [10]..... | 7 |
| Slika 5. | Translacijski skener [11] | 8 |
| Slika 6. | Konusni skener [12] | 9 |
| Slika 7. | Komponente rendgenske cijevi [13]..... | 10 |
| Slika 8. | Spektar rendgenskog zračenja [14] | 11 |
| Slika 9. | Vrste detektora [2]..... | 13 |
| Slika 10. | Povećanje detalja slike [2]..... | 14 |
| Slika 11. | Utjecaj broja kutova snimanja na preciznost rekonstrukcije [2] | 15 |
| Slika 12. | Utjecajni parametri na mjernu nesigurnost | 17 |
| Slika 13. | Utjecaj promjene ulaznih parametara na intenzitet i snagu zračenja [2]..... | 19 |
| Slika 14. | Prednost korištenja filtera [2] | 21 |
| Slika 15. | Dimenzionalna usporedba sa 3D modelom [1] | 23 |
| Slika 16. | Ispitivanje strukture materijala [1] | 24 |
| Slika 17. | Presječena ravnina [1] | 24 |
| Slika 18. | Analiza sklopa [17] | 25 |
| Slika 19. | Nikon XT H 225 [19] | 27 |
| Slika 20. | Rekonstruirani 3D model | 29 |
| Slika 21. | Odabir metoda prilagodbe modela za mjerenje promjera | 30 |
| Slika 22. | Odabir metoda prilagodbe modela za mjerenje duljine..... | 31 |
| Slika 23. | Aproksimirane ravnine za mjerenje paralelnosti | 32 |
| Slika 24. | Odabir metode prilagodbe modela | 33 |
| Slika 25. | Gaussova metoda [23] | 34 |
| Slika 26. | Chebysheva metoda [23] | 35 |
| Slika 27. | Metoda najmanje opisane kružnice [23] | 37 |
| Slika 28. | Metoda najveće upisane kružnice [23] | 38 |
| Slika 29. | Raspon rezultata mjerenja | 41 |
| Slika 30. | Razina značajnosti testa (α) [26] | 42 |
| Slika 31. | Usporedba odstupanja vanjskih i unutarnjih promjera..... | 43 |
| Slika 32. | Usporedba odstupanja duljine i paralelnosti | 43 |
| Slika 33. | Usporedba odstupanja sve četiri značajke..... | 44 |
| Slika 34. | Iznos odstupanja u mikrometrima | 47 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Specifikacije uređaja [21]..... | 28 |
| Tablica 2. Parametri skeniranja | 39 |
| Tablica 3. Rezultati mjerenja različitim metodama..... | 39 |
| Tablica 4. Referentne vrijednosti cilindra | 40 |
| Tablica 5. Odstupanja od referentnih vrijednosti | 40 |
| Tablica 6. Raspon rezultata mjerenja | 41 |
| Tablica 7. Izračun aritmetičke sredine i standardne devijacije | 45 |
| Tablica 8. Aritmetičke i referente vrijednosti | 46 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|------------------|---------------|--|
| E | keV | Mjerna jedinica za energiju u atomskoj i molekularnoj fizici |
| e_x, e_y | mm | Koordinate središta kružnice |
| R_i | mm | Polumjer kružnice |
| U | kV | Napon |
| I | μA | Jakost struje |
| n | | Broj projekcija |
| \varnothing_u | mm | Unutarnji promjer |
| \varnothing_v | mm | Vanjski promjer |
| l | mm | Duljina |
| // | mm | Paralelnost |
| \bar{x}_i | mm | Aritmetička sredina |
| s_i | mm | Standardna devijacija |
| x_{ref} | mm | Referentna vrijednost |

POPIS KRATICA

CAD - *Computer aided design*

CT - *Computed Tomography*

2D - *Two-dimensional object*

3D - *Three-dimensional model*

CMM - *Coordinate measuring machine*

LSC - *Least Squares Circle*

MZC - *Minimum Zone Circles*

RGC - *Ring Gage Center*

PGC - *Plug Gage Center*

ANOVA - *Analysis of variance*

SAŽETAK

Računalna tomografija je vrlo pouzdana tehnologija koja se već dugo vremena koristi u medicinske svrhe. U zadnje vrijeme primjenu nalazi i u industriji za potrebe dimenzionalnih mjerenja. No što se tiče točnosti i pouzdanosti rezultata mjerenja, i dalje postoji velik broj neriješenih problema koji utječu na rezultat mjerenja.

U ovom radu opisan je princip rada CT uređaja, navedeni su utjecajni parametri na mjernu nesigurnost, te je analiziran utjecaj prilagodbe modela izmjerenom oblaku točaka. Također je eksperimentalno procijenjen utjecaj prilagodbe modela na točnost i preciznost mjerenja dimenzionalnih i geometrijskih značajki.

Ključne riječi: računalna tomografija, dimenzionalno mjerenje, metode prilagodbe modela

SUMMARY

Computed tomography (CT) is a well-established technology in medical diagnostics. For a few years now, dedicated CT systems have also been in use for dimensional measurements in industry. However, as far as the accuracy and reliability of the results is concerned, many problems are still unsolved.

This paper describes operating principle of CT devices, parameters that influence the measurement uncertainty, and the impact of data fitting to the volume/polygon object. Here is also given an experimental evaluation of the impact of data fitting on accuracy and precision of dimensional and geometric computed tomography measurements.

Key words: Computed tomography (CT), dimensional measurement, data fitting models

1. UVOD

Računalna tomografija danas glasi kao najnaprednija i najmoćnija tehnologija koja se koristi na području industrijskih mjerenja i za analiziranje proizvoda izrađenih od više različitih materijala. Specifičnost ove tehnologije je, za razliku od ostalih, mogućnost uvida unutarnje strukture predmeta s ciljem uočavanja nedostataka ili nepravilnosti nastalih u procesu proizvodnje te provedbe detaljnih mjerenja bez potrebe za prethodnim razaranjem predmeta. Upravo ovo zadnje je glavna prednost primjene računalne tomografije u industrijske svrhe, pa se stoga može zaključiti da ovakav pristup spada u područje nerazornih ispitivanja. Prije nego se ova tehnologija počela primjenjivati u industrijske svrhe, proizvođači su vrlo često morali rezati izratke (ili prototipove) kako bi mogli analizirati njegove unutarnje značajke. Takav pristup je znatno kompliciraniji, vremenski duži, a samim time i troškovno skuplji. Potpuna dimenzionalna kontrola i usporedba s CAD modelom nerijetko je trajala nekoliko dana, a nekada čak i tjedana. S obzirom na današnje vrlo složeno i dinamično tržište, vrijeme je od neprocjenjive važnosti te se primjenom računalne tomografije za navedene svrhe može održati konkurentnost poduzeća na tržištu [1].

1.1. Područja primjene računalne tomografije

Računalna tomografija nalazi primjenu u tri glavna područja. To su medicina, analiza materijala i dimenzionalna analiza. Prvi uređaj koji je imao mogućnost računalnog upravljanja rendgenskim zrakama (eng. *Computed Tomography* - CT) izumio je britanski inženjer Godfrey Hounsfield 1972. godine. Taj uređaj imao je primjenu za medicinske svrhe. Nešto kasnije, 80-ih godina prošlog stoljeća CT je postao popularan za potrebe analize materijala, odnosno za nerazorna ispitivanja. To je dovelo do mogućnosti promatranja unutarnje strukture materijala i otkrivanje nedostataka. S vremenom je tehnologija ušla u područje dimenzionalne analize i postala alternativa trokoordinatnim mjernim uređajima, mjernim rukama, fotogrametrijskim metodama itd. Prvi pokušaj primjene CT uređaja za dimenzionalna mjerenja bio je 1991. godine.

Sva tri područja primjene, odnosno CT uređaji za primjenu u tim područjima temelje se na istim matematičkim principima i fizikalnim zakonima, ali se uređaji i procedure znatno razlikuju. U medicini doza radijacije i snaga izvora zračenja su limitirani na određenu vrijednost zbog zaštite pacijenata jer izloženost takvom zračenju narušava biokemijske

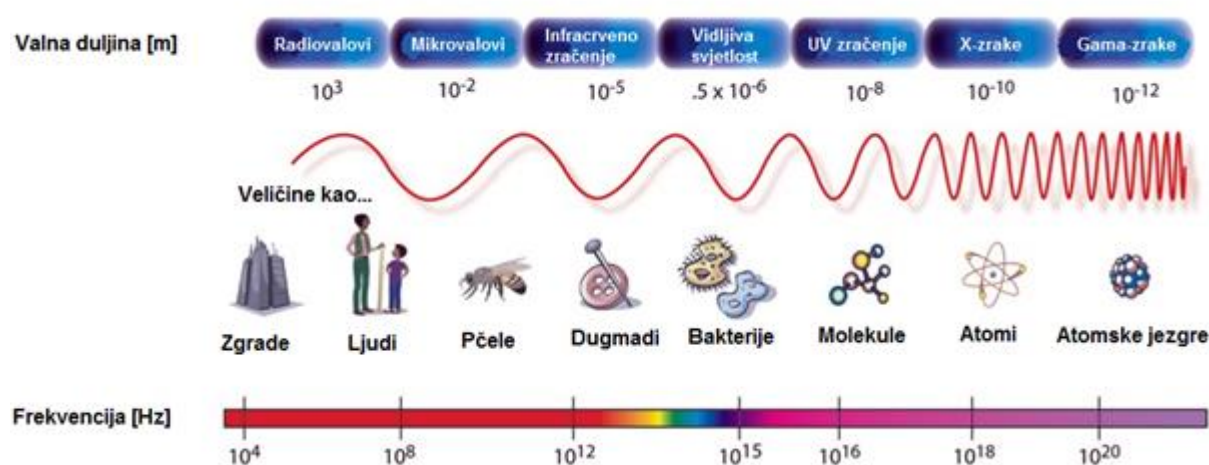
procesu u stanicama, što može dovesti do raznih poremećaja te u konačnici do ozbiljnih bolesti. Objekt analize u medicini je pacijent koji se ne rotira, već stoji na mjestu, dok se kod industrijskih CT uređaja u pravilu predmet rotira na okretnom stolu. Također zahtjevi za rezoluciju i točnost su niži kod uređaja za medicinske svrhe. S druge strane, kod industrijskih CT uređaja potrebna je veća prodornost rendgenskih zraka, veća snaga izvora zračenja te veća rezolucija i točnost mjerenja [2].

2. OSNOVE RAČUNALNE TOMOGRAFIJE

Osnovu ove tehnologije predstavljaju rendgenske zrake koje prolaskom kroz predmet mjerenja padaju na detektor te se na temelju višestrukog mjerenja apsorbiranih vrijednosti rekonstruiraju poprečni tomografski slojevi koji u konačnici tvore trodimenzionalni model predmeta. Do danas se tehnologija toliko razvila da je jedina koja jednako dobro može mjeriti vanjsku i unutarnju strukturu bez potrebe za razaranjem predmeta. U nastavku je ukratko pojašnjen princip rada CT uređaja.

2.1. Priroda rendgenskih zraka

Rendgenske zrake oblik su elektromagnetskog zračenja kao i svjetlost. No za razliku od svjetlosti imaju otprilike deset tisuća puta kraću valnu duljinu. Upravo ta mala valna duljina omogućava prolaz rendgenskih zraka kroz predmet mjerenja, čija površina apsorbira ili reflektira vidljivu svjetlost.



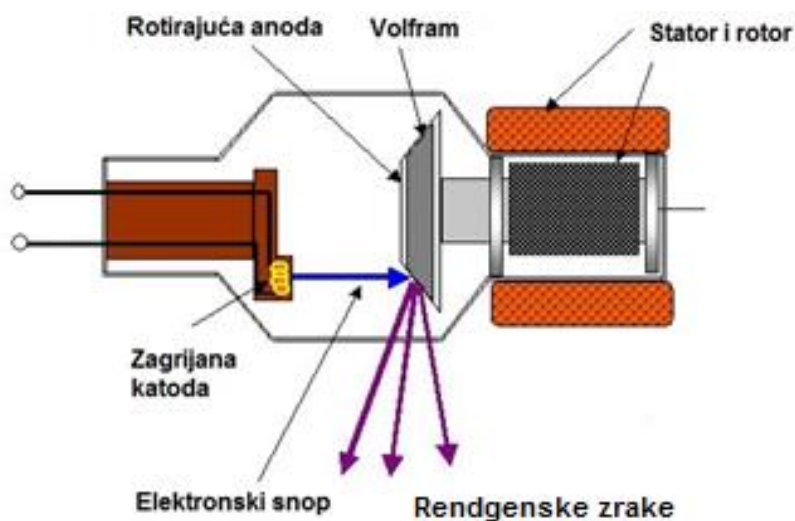
Slika 1. Elektromagnetski spektar [4]

Slika 1 prikazuje oblike elektromagnetskog zračenja i usporedbu njihovih valnih duljina.

Rendgenskim zrakama je vrlo teško upravljati. U odnosu na svjetlost koja se lako lomi, odnosno reflektira, rendgensku zraku gotovo je nemoguće reflektirati, ali i onda kada se to uspije potrebni su najnapredniji uređaji za detekciju te promjene smjera [3].

2.2. Nastanak rendgenske zrake

Rendgenske zrake nastaju u rendgenskoj cijevi. To je vakuumska cijev u kojoj se na suprotnim stranama nalaze katoda i anoda. Katoda sadrži žarnu nit koja je na visokom naponu u odnosu na anodu. Prolaskom električne struje žarnom niti ona se užari te izbacuje elektrone koji ubrzavaju u električnom polju između katode i anode. Elektroni se zatim sudaraju velikim brzinama s anodom, naglo usporavaju i izbijaju elektrone iz unutarnjih ljuski atoma metala te u konačnici nastaju rendgenske zrake. Anoda je napravljena od materijala (najčešće volfram ili molibden) otpornog na visoke temperature i tijekom procesa nastanka rendgenske zrake rotira se kako bi se omogućilo učinkovitije hlađenje.



Slika 2. Temeljni princip nastanka rendgenske zrake [6]

Na slici 2 je grafički prikazan proces nastanka rendgenske zrake.

U tom procesu 99 % energije elektrona se pretvara u toplinu, dok samo 1 % energije odlazi u obliku ionizirajućeg zračenja koje pod pravim kutom izlaze kroz mali otvor na dnu rendgenske cijevi. Što je viši napon na katodi, ostvaruje se veća brzina elektrona i samim time postiže se kraća valna duljina emitiranih zraka. Manja valna duljina rezultira većim intenzitetom zračenja i prodornosti. Viši napon se uglavnom koristi za mjerenje materijala veće gustoće i deblje stijenke. Snaga izvora zračenja kreće se najčešće u rasponu od 100 kV do 400 kV [5].

2.3. Princip rada

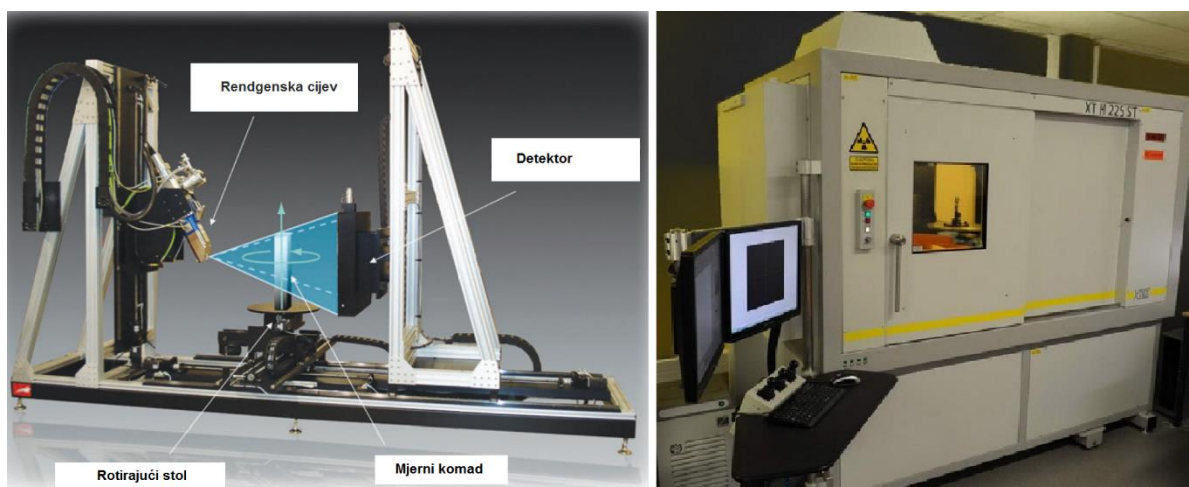
U pravilu predmet mjerenja je zatvoren unutar CT uređaja. Postoje iznimke, odnosno otvorene izvedbe uređaja koje služe za mjerenje većih predmeta koji zbog svog volumena ne bi stali u zatvoreni uređaj.

Princip rada je sljedeći. Rendgenska cijev (izvor zračenja) generira rendgenske zrake koje se usmjeravaju prema detektoru zračenja. Predmet se nalazi na okretnom stolu između izvora i detektora. Prolaskom rendgenskih zraka kroz predmet, one istovremeno oslabljuju zbog apsorpcije ili raspršenja i padaju na detektor. Intenzitet slabljenja određen je duljinom protoka zrake kroz materijal, sastavom materijala, njegovom gustoćom i snagom zračenja [2]. Slabljenje se mjeri detektorom hvatanjem preostalih rendgenskih zraka koje su prošle kroz predmet. Detektor stvara električne signale koji ovise o količini dospjelog zračenja te računalnom obradom tih signala nastaje slika s nijansama sive boje. Ovisno o vrsti detektora, može nastati jednodimenzionalna ili dvodimenzionalna slika.

Slike se dobivaju skeniranjem iz različitih kutova. Predmet rotira na okretnom stolu za puni krug, tj. 360° . Broj dobivenih slika ovisi o tome svakih koliko stupnjeva rotacije predmeta se uzima slika. Tako npr. uzimanjem slike svakih pola stupnja u konačnici se ukupno dobije 720 slika. Primjenom matematičkih algoritama na temelju slika rekonstruira se trodimenzionalni model sačinjen od voksel. Voksel je trodimenzionalni piksel. Svakom vokselu se dodjeljuje vrijednost nijanse sive boje koja odgovara lokalnoj apsorpciji rendgenskog zračenja. Sljedeći koraci obuhvaćaju procesiranje podataka voksel, uključujući detekciju rubova predmeta i na kraju dimenzionalna mjerenja. Nakon dobivanja modela moguće je napraviti presjek u svim željenim ravninama [7].

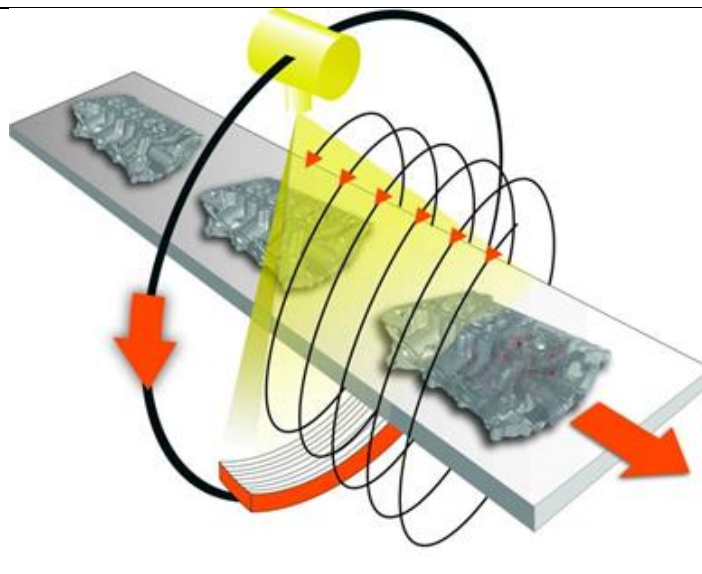
3. IZVEDBE CT UREĐAJA

Danas se na tržištu mogu pronaći CT uređaji u različitim izvedbama. Najpoznatija je zatvorena izvedba, no postoje i one manje poznate, a to su otvorena i „on line“ izvedba. Otvorene izvedbe se koriste u slučaju potrebe za mjerenjem većih predmeta koje je nemoguće smjestiti unutar klasičnih zatvorenih izvedbi. Kod njih postoji veći rizik za ljudsko zdravlje. Najčešća primjena takvih CT uređaja je u zrakoplovnoj industriji i brodogradnji.



Slika 3. Otvorena [8] i zatvorena [9] izvedba CT uređaja

Posebna je „on line“ izvedba CT uređaja. Takve izvedbe omogućuju brza skeniranja predmeta za zahtjeve velikoserijske ili masovne proizvodnje. Princip rada sličan je medicinskim CT uređajima. Predmeti koji se nalaze na pokretnoj traci kontinuirano prolaze kroz uređaj, a rendgenska cijev i detektor rotiraju oko pokretne trake [10].



Slika 4. Prikaz izvora zračenja i detektora na rotirajućem postolju [10]

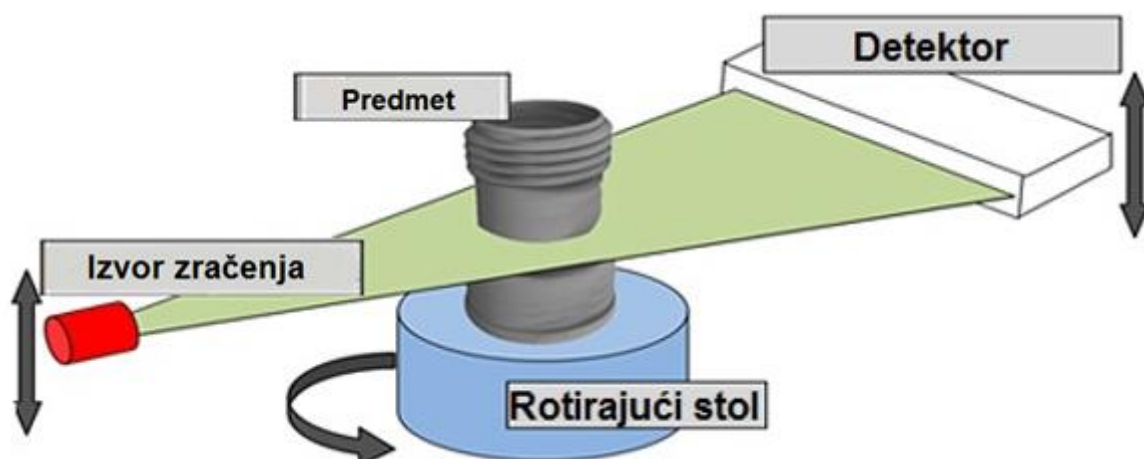
Na slici 4 prikaz je princip rada „on line“ izvedbe CT uređaja gdje predmeti postavljeni na pokretnoj traci kontinuirano prolaze kroz okretno postolje na kojem su smješteni izvor rendgenskog zračenja i na suprotnoj strani detektor.

3.1. Vrste CT skenera

S obzirom na vrstu detektora koji se primjenjuje, skeneri mogu biti translacijski ili konusni. U nastavku su ukratko objašnjene obje vrste skenera.

3.1.1. Translacijski skeneri

Translacijski skeneri spadaju u prvu generaciju industrijskih CT skenera. Kod translacijskih skenera izvor zračenja usmjerava rendgenske zrake tako da imaju oblik lepeze i čine horizontalnu površinu. Izvor zračenja se translacija (gore ili dolje) kako bi mogao skenirati cijeli predmet. Važno je napomenuti da se tijekom procesa skeniranja predmet rotira oko osi rotirajućeg stola na kojem se nalazi. Detektor na koji padaju rendgenske zrake je linijski i translacija zajedno s izvorom zračenja. Zbog linijskog detektora ovim načinom moguće je mjeriti dvodimenzionalnu geometriju u jednom okretaju predmeta [11].

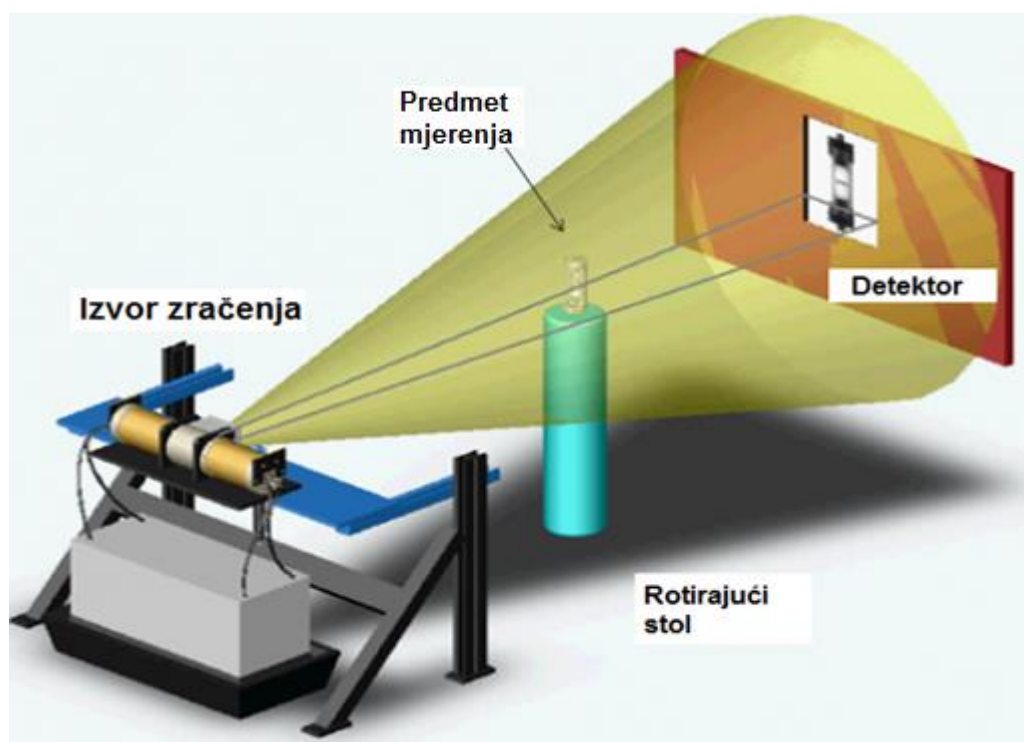


Slika 5. Translacijski skener [11]

Slika 5 prikazuje princip rada translacijskog CT uređaja gdje izvor rendgenskog zračenja i detektor obavljaju translacijsko gibanje, dok se predmet rotira na okretnom stolu.

3.1.2. Konusni skeneri

Kod konusnih skenera izvor zračenja usmjerava rendgenske zrake tako da čine oblik konusa. Tijekom procesa skeniranja predmet rotira na okretnom stolu. Na temelju rendgenskih zraka koje padaju na detektor nastaju dvodimenzionalne slike. Slike se zatim obrađuju pomoću računala s ciljem konstruiranja trodimenzionalnog modela koji prikazuje i unutarnje značajke predmeta. Detektor na koji padaju rendgenske zrake je pločasti i za razliku od linijskog je nepokretan. Zbog pločastog detektora ovim načinom moguće je mjeriti trodimenzionalnu geometriju u jednom okretaju predmeta [11].



Slika 6. Konusni skener [12]

Slika 6 prikazuje princip rada konusnog CT uređaja kod kojeg su izvor rendgenskog zračenja i detektor nepomični, a predmet se rotira na okretnom stolu.

4. GLAVNE KOMPONENTE CT UREĐAJA

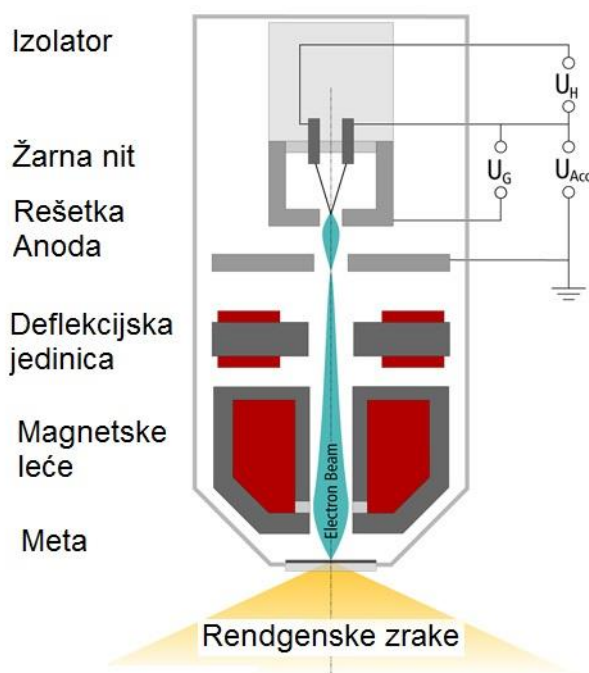
Glavne komponente CT uređaja su hardverske komponente koje u biti omogućavaju proces mjerenja ili skeniranja te softverski alati za analizu i vizualizaciju rezultata.

4.1. Hardver

Najvažnije hardverske komponente CT uređaja su izvor rendgenskih zraka, detektor i kinematički sustav. U nastavku je pojedinačno objašnjena svaka komponenta.

4.1.1. Izvor rendgenskog zračenja

Rendgenska cijev, ili vakuumska cijev, obično se sastoji od pištolja koji sadrži katodnu žarnu nit za emitiranje elektrona, anodu za ubrzavanje elektrona, elektrodu za kontroliranje elektronske zrake (konvergenciju i intenzitet), magnetske deflektore i leće za fokusiranje elektronske zrake prema meti kako bi se generirala rendgenska zraka.



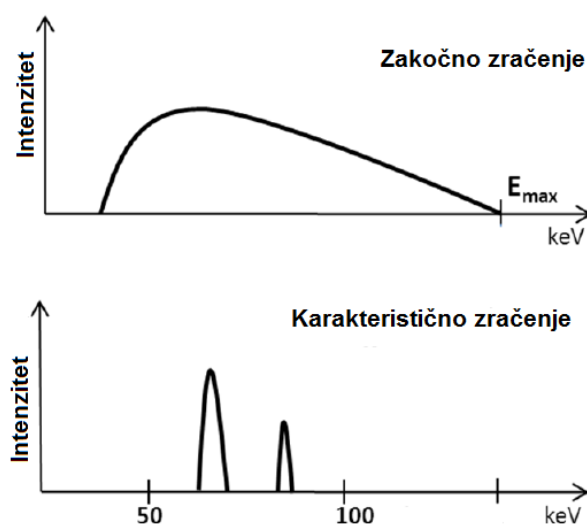
Slika 7. Komponente rendgenske cijevi [13]

Kada pogode metu, elektroni iznenada usporavaju pri čemu se njihova energija pretvara gotovo potpuno u toplinu, dok samo 1 % odlazi kao rendgenska zraka. Što je elektronska

zraka kraće valne duljine time se dobiva jasnija slika. U današnje vrijeme snage izvora zračenja su ograničene na 450 kV za komercijalne izvore, a izvori od 800 kV su još pod testiranjima. Na kraju rendgenske cijevi rendgenska zraka izlazi kroz kružni otvor ili dijafragmu (za konusne skenere) ili kroz kolimirajuće ploče kako bi se dobila ravna zraka. Na kraju otvora nalazi se berilijem koji osigurava vakuum u cijevi.

Meta može biti napravljena od različitih materijala koji daju različite spektre radijacije. Mete mogu biti emitirajuće (tanka ploča) ili reflektirajuće (masivna meta). Emitirajuće se koriste kod niskonaponskih izvora CT uređaja jer nisu podobne za visoke temperature. S druge strane visokonaponski CT izvori su opremljeni sa reflektirajućim metama koje se dodatno hlade vodom.

Proizvedena rendgenska zraka sastoji se od zakočne i karakteristične radijacije. Zakočna radijacija je primarni proces proizvodnje rendgenske zrake. Nastaje kada se elektroni sudare s atomskom jezgrom na meti, što dovodi do istovremenog usporavanja atoma i emisijom fotona s kontinuiranim spektrom intenziteta po različitim valnim duljinama. Na taj način se energija kontinuirano povisuje do maksimalne vrijednosti. Karakteristična radijacija se pojavljuje kada elektron pod visokom energijom udari i pobudi unutarnje elektrone nižih energetske razina u elektronskom omotaču atoma na meti. Popunjavanjem tih praznih mjesta elektronima iz viših energetske razina nastaje rendgensko zračenje sa samo nekoliko valnih duljina. Zove se karakteristična jer ovisi o materijalu mete.



Slika 8. Spektar rendgenskog zračenja [14]

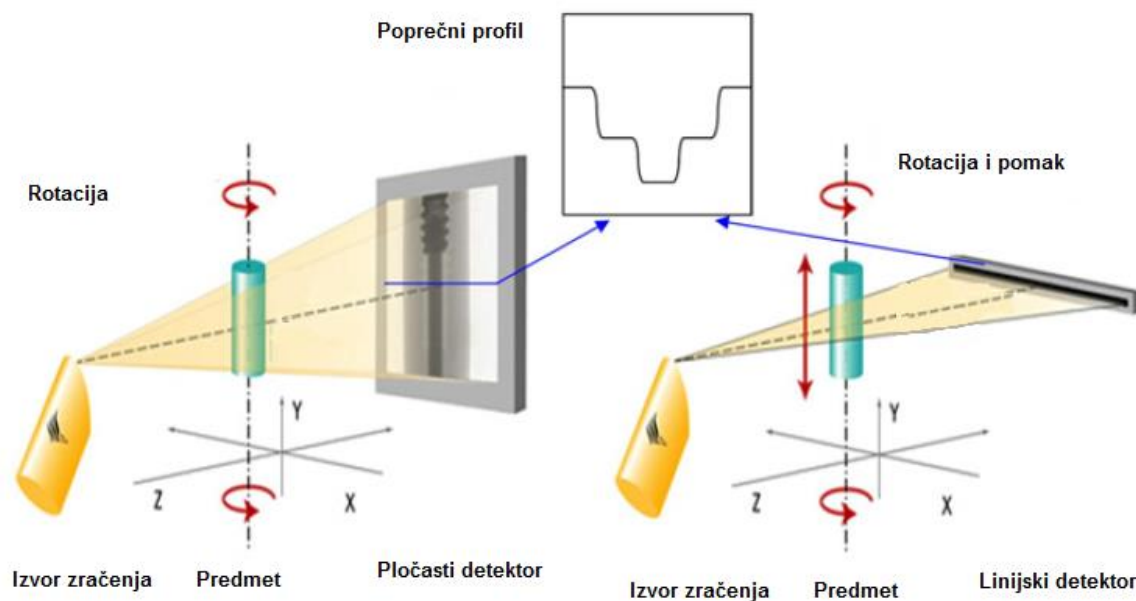
Slika 8 prikazuje spektar zračenja za zakočno i karakteristično zračenje.

Generirana rendgenska zraka je karakterizirana svojom energijom i intenzitetom. Intenzitet rendgenske zrake je mjera količine protoka radijacijske energije u jedinici vremena. Najviša rendgenska energija prisutna u rendgenskom spektru određuje prodornu snagu rendgenske zrake [2].

4.1.2. Detektor

Detektori koji se danas upotrebljavaju na CT uređajima su pločasti i linijski (zakrivljeni ili ravni). Kod pločastih detektora pikseli tvore neku površinu, dok kod linijskih su poredani u neku liniju. Linijski detektori (1D) pružaju veću točnost, efikasniji su i podnose veće energije što im omogućuje mjerenje debljih predmeta. Mana linijskih detektora je u vremenu potrebnom da se obavi mjerenje jer se u jednom okretaju premeta izmjeri samo jedan njegov odsječak. Mjerenje predmeta visokog 100 mm s razmacima između odsječaka 100 μm , traje 1000 puta duže nego primjenom pločastog detektora. Razlog veće točnosti linijskih detektora naspram pločastih leži u tome što omogućuju korištenje kolimiranih rendgenskih zraka i pridonose manjoj međusobnoj interakciji između piksela i njihovom raspršivanju. U pravilu, postoje tri principa detektora. Izlazni podaci detektora su proporcionalni ukupnom broju sudara fotona, ili su proporcionalni ukupnoj energiji fotona, ili se temelje na depoziciji energije po jedinici mase. Najučinkovitiji i najprimjenjiviji su oni kod kojih su izlazni podaci proporcionalni ukupnoj energiji fotona. Nazivaju se još i indirektni detektori.

Danas se uglavnom koriste pločasti 2D detektori maksimalne rezolucije 2048 piksela, pri čemu je veličina piksela 250 μm i mogu podnijeti snage do 250 keV. Kod većih snaga (80 keV do 10 MeV) primjenjuju se linijski detektori koji mogu imati rezoluciju do 3000 piksela pri koraku od 250 μm [2].



Slika 9. Vrste detektora [2]

Na slici 9 prikazani su pločasti i linijski detektor, izvor zračenja te okretni stol s pripadajućim koordinatnim osima.

4.1.3. Kinematički sustav

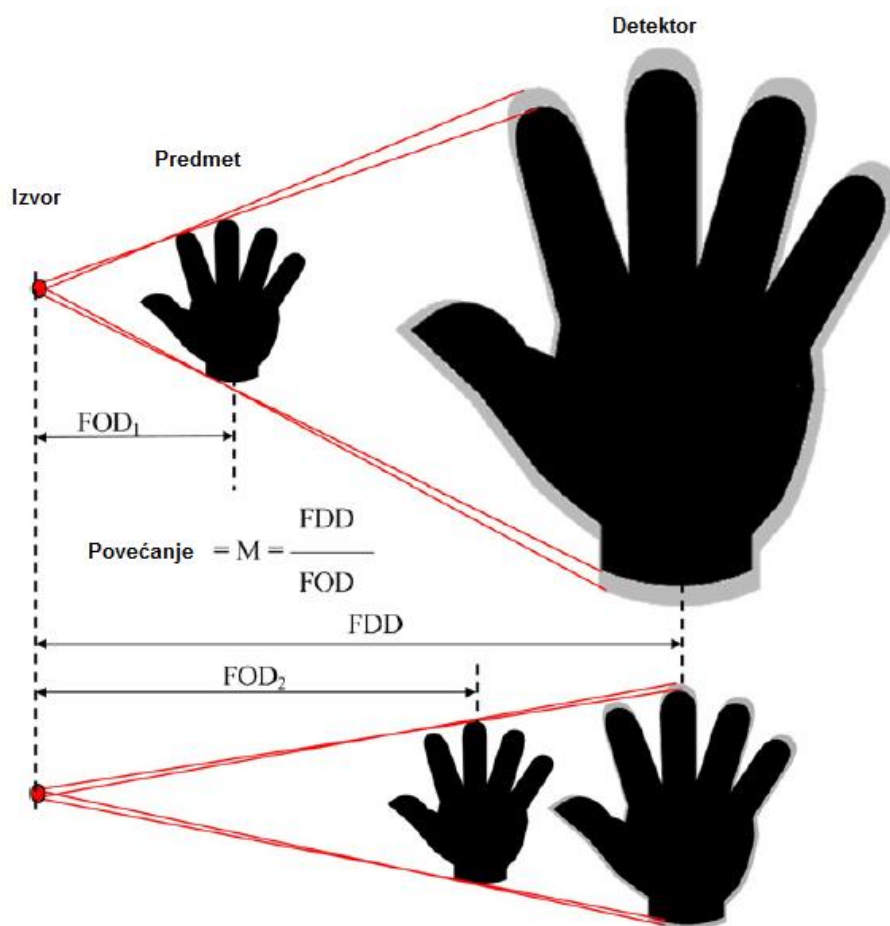
Kod medicinskih CT uređaja, rendgenska cijev i detektor kontinuirano rotiraju oko pacijenta, dok se pacijent horizontalno translacija kroz prostor između cijevi i detektora. Kod industrijskih CT skenera, rendgenska cijev i detektor su u pravilu fiksirani, dok se predmet rotira u prostoru između njih s ili bez vertikalnog translacijskog gibanja ovisno o korištenom detektoru.

Pod kinematičkim sustavom CT uređaja se podrazumijeva [2]:

1. Rotacija predmeta postepeno ili kontinuirano na okretnom stolu.
2. Horizontalna translacijska os (os Z) za pozicioniranje okretnog stola (s predmetom) između izvora zračenja i detektora. Ova os se često referira kao magnifikacijska os: Veće geometrijsko povećanje postiže se pozicioniranjem predmeta bliže izvoru zračenja. Međutim veće povećanje ima svoje prednosti i mane. Povećava rezoluciju slike, ali uzrokuje mutniju sliku kao što se vidi na slici 10.
3. Horizontalna translacijska os (os X) za pomicanje okretnog stola paralelno detektoru. To omogućuje pozicioniranje predmeta izvan područja mjerenja.

4. Vertikalna translacijska os (os Y) za pomicanje okretnog stola (ili izvora i detektora). Pri korištenju pločastih detektora, ova os se koristiti za pozicioniranje predmeta u područje mjerenja i/ili za povezivanje mjernih područja većih predmeta koji se moraju mjeriti u više puta. Kod linijskih detektora, vertikalna os pruža neophodan pomak za skeniranje odsječaka ili kontinuiranu translaciju za spiralan CT.

Komponente kinematičkog sustava trebaju imati visoku točnost i stabilnost (geometrijsku i toplinsku) jer utječu na ishod mjerenja. Greške pozicioniranja okretnog stola i kvaliteta rotacije utječu na kvalitetu rekonstrukcije modela, dok greške pozicioniranja i ponovljivosti u smjeru z osi izravno utječu na izmjerene dimenzije zbog promjene faktora povećanja [2].



Slika 10. Povećanje detalja slike [2]

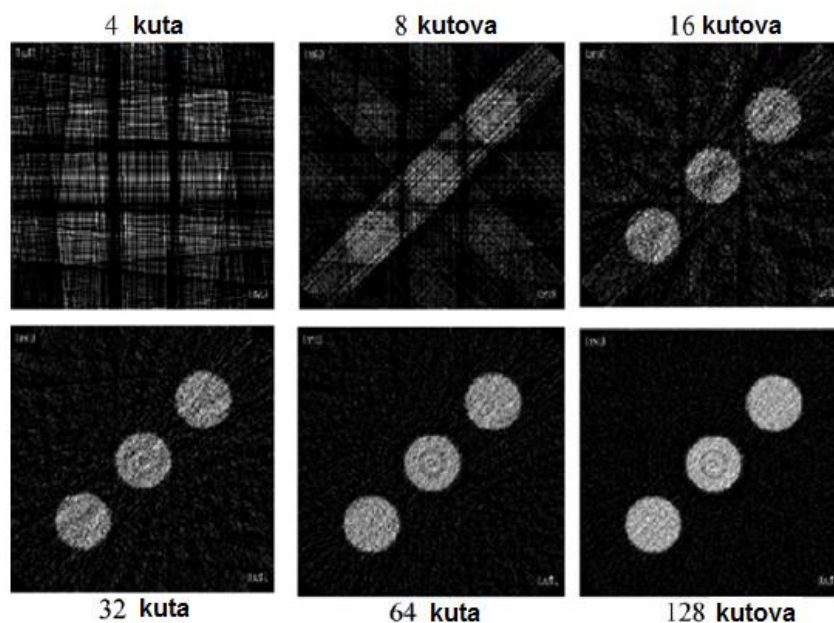
Slika 10 prikazuje što se događa s dobivenom slikom pomicanjem predmeta po Z osi. Vidljivo je da su rubovi mutniji što se predmet nalazi bliže izvoru i obrnuto.

4.2. Softver

Dvije osnovne značajke softvera kod CT uređaja su mogućnost rekonstrukcije trodimenzionalnog modela i dimenzionalna analiza.

4.2.1. Alati za rekonstrukciju modela i prepoznavanje rubova

Osim hardvera, softvere također ima bitnu ulogu, pogotovo kod rekonstrukcije modela iz dobivenih dvodimenzionalnih slika. Rekonstrukcija se obično radi kao filtrirana povratna projekcija koja se temelji na matematičkom modelu linearne integralne transformacije razvijenom od strane J. Radona 1917. godine. Rekonstrukcija modela je tim više preciznija, što se iz više kutova skenira objekt.



Slika 11. Utjecaj broja kutova snimanja na preciznost rekonstrukcije [2]

Na slici 11 prikazani su rezultati rekonstrukcije tri poravnate kuglice s obzirom na broj kutova iz kojih su nastale slike. Vidljivo je da porastom broja kutova snimanja raste i kvaliteta rekonstrukcije.

Otkrivanje rubova, odnosno prepoznavanje granica između čvrstih materijala i okolnog zraka ili različitih materijala važno je pri rekonstrukciji 3D modela. Ova aplikacija pretvara 3D voksel podatke u 3D površinske podatke. Postoje različite metode za otkrivanje rubova. Neke od metoda su metoda dodjeljivanja početnih vrijednosti nijansi sive rubnim vokselima,

interpolacija između vrijednosti nijansi sivih vokseli, potraga za maksimalnim vrijednostima sive nijanse itd. Pojačanje zračenja i ostale pogreške slike mogu ometati pravilnu detekciju rubova, jer mijenja vrijednost nijanse sive boje rubnog piksela [2].

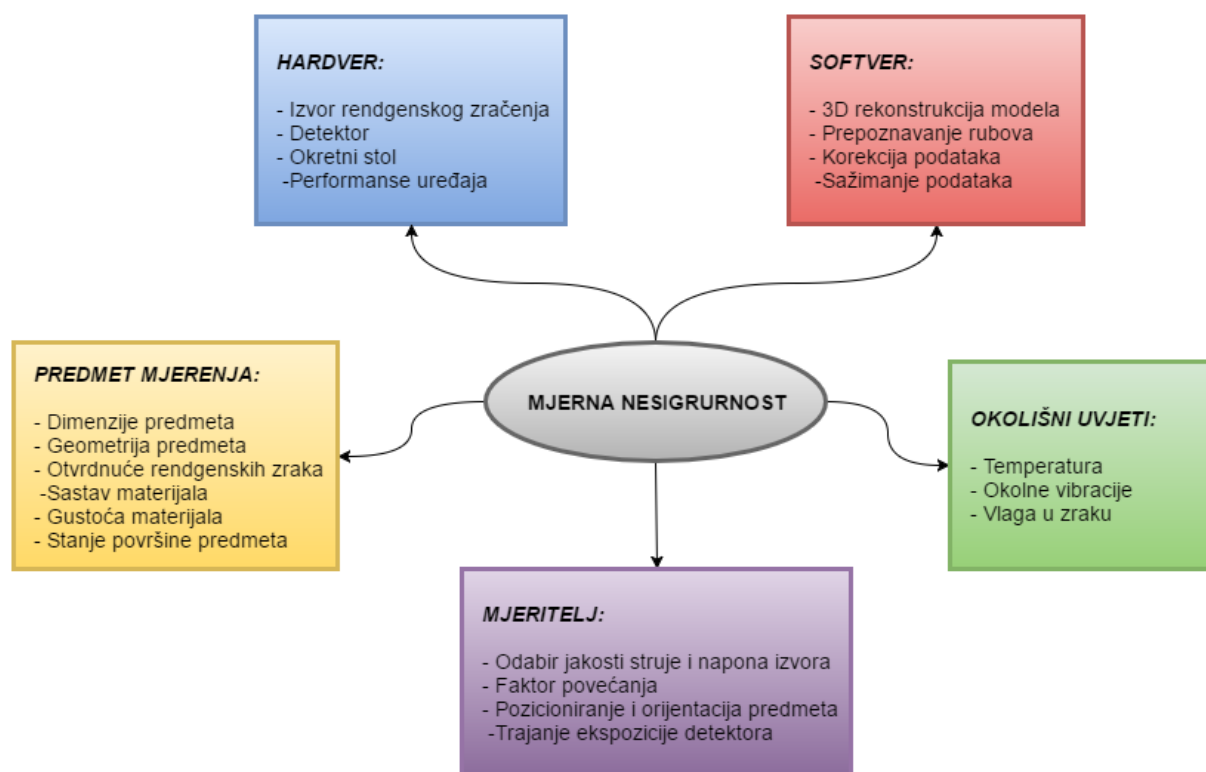
4.2.2. Alati za dimenzionalnu analizu

Dok se softver za rekonstrukciju modela i prepoznavanje rubova primjenjuje na svim CT uređajima, za dimenzionalnu analizu potreban je dodatni softver koji bi izvlačio geometrijske značajke (ravnine, sfere, cilindre itd.) i računao geometrijske podatke (poziciju, orijentaciju, dimenziju, dužinu, promjer, kut itd.). Dimenzionalna analiza često zahtjeva drukčije korake obrade podataka. To su pretvorba podataka u oblak točaka, slojevite modele, geometrijske značajke ili CAD model na kojem se mjerenje može obaviti. Ovo zahtjeva posebne procese konverzije podataka i program za analizu te različite korake obrade. Softver bi trebao pružati većinom sve zadatke dimenzionalnog mjerenja dostupne u tradicionalnim CMM softverskim paketima [2].

5. MJERNA NESIGURNOST I MJERITELJSKA SLJEDIVOST

Mjerna nesigurnost definira se kao nenegativni parametar koji opisuje rasipanje vrijednosti veličine koje se na temelju upotrijebljenih podataka pridružuju mjerenoj veličini [15].

To je jedina karakteristika koja opisuje kvalitetu specifičnog mjernog rezultata. Pri svakom mjerenju treba uzeti u obzir mjernu nesigurnost kako bi se ostvarila sljedivost rezultata mjerenja prema osnovnim SI jedinicama i kako bi se uspostavila sukladnost ili nesukladnost s tolerancijama. Stoga svako dimenzionalno mjerenje mora uzeti u obzir korekciju zbog mjerne nesigurnosti. S obzirom na to da kod CT uređaja postoje različiti utjecaji na mjernu nesigurnost koji variraju od mjerenja do mjerenja, računanje mjerne nesigurnosti je iznimno zahtjevan posao jer ovisi o postavkama izvora zračenja, geometriji objekta, materijala, orijentacije i pozicioniranja, detektora, okoline, mjeritelja, algoritama obrade podataka, strategiji mjerenja itd. Na sljedećoj slici su prikazani najčešći utjecajni parametri na mjernu nesigurnost [2].



Slika 12. Utjecajni parametri na mjernu nesigurnost

Do sada još nisi definirani međunarodni standardi ili smjernice koje se odnose na procjenu mjerne nesigurnosti za specifične slučajeve CT mjerenja zbog jako puno utjecajnih parametara i njihove međusobne interakcije. Kako mjerna nesigurnost čvrsto ovisi o specifičnom zadatku mjerenja i mjernim veličinama, ne postoje univerzalni korekcijski koeficijenti kojima bi se korigirali dobiveni rezultati. Međutim primjenjuju se različiti pristupi određivanja mjerne nesigurnosti za industrijske CT uređaje [2]:

- Analitički izrazi za izračun mjerne nesigurnosti (klasična GUM metoda)
- Varijabilne simulacije (npr. Monte Carlo simulacije)
- Eksperimentalno određivanje sustavnih i stohastičkih varijabilnosti
- Stručno znanje i procjena
- Kombinacija prethodnih metoda

U nastavku su opisani bitniji parametri i utjecajni faktori na rezultate CT mjerenja koji mogu biti ispravljeni od strane mjeritelja kako bi se dobile kvalitetne slike.

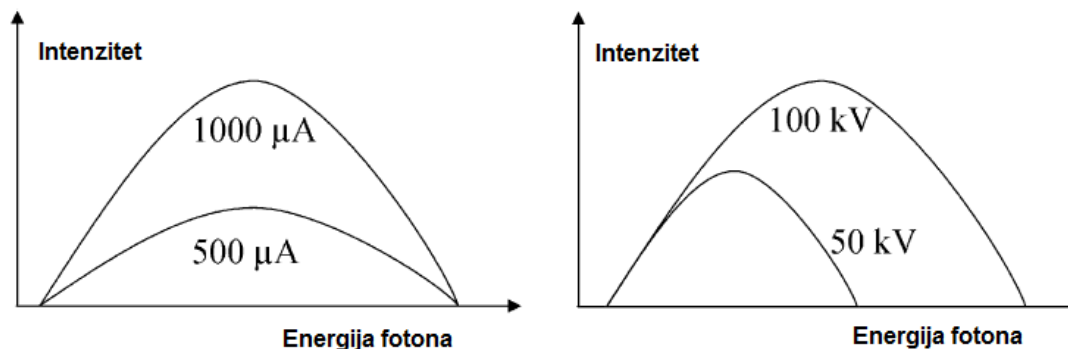
5.1. Meta

Meta izvora rendgenskog zračenja je karakterizirana vrstom (propusna, reflektivna, rotacijska itd.) i materijalom (volfram, molibden, bakar itd.). Svaki materijal ima različit broj protona. Interakcije elektrona emitiranih sa žarne niti i atoma metala mete ovise o broju protona materijala mete, što utječe na generiranu radijaciju. O broju protona ovisi i kvaliteta radijacije. Materijal mete treba biti odabran kako bi zadovoljio uvjete mjerenja. Zbog toga neki proizvođači nude mete napravljene od više materijala koje omogućavaju fleksibilnost u smislu mjerenja s različitim spektrima radijacije [2].

5.2. Snaga izvora zračenja

Snaga izvora rendgenskog zračenja karakterizirana je naponom (kV) i jakosti struje (μA) elektronskog zračenja koje udara metu i proizvodi rendgensku zraku. Jakost struje izravno utječe na intenzitet rendgenskog zračenja, ali ne utječe na kvalitetu zrake (snagu zračenja, odnosno prodornost). Dvostrukim povećanjem jakosti struje dvostruko se povećava i intenzitet zračenja. Napon utječe i na intenzitet (količina zraka) i kvalitetu zračenja (penetracija u keV). Napon utječe na kvalitetu jer o njemu ovisi maksimalna energija fotona pa time i snaga penetracije. Odabir pravilnog napona i struje za specifično mjerenje je vrlo

težak zadatak. Pri tome u obzir treba uzeti materijal predmeta, njegovu gustoću, geometriju itd. [2].



Slika 13. Utjecaj promjene ulaznih parametara na intenzitet i snagu zračenja [2]

Na slici 13 vidi se utjecaj povećanja jakosti struje i napona izvora na intenzitet i prodornost rendgenskih zraka.

5.3. Materijal i geometrija predmeta

Rendgenske zrake slabe prilikom prolaska kroz predmet što ovisi o materijalu i faktoru oslabljenja. Slabljenje zraka u rasponu napona izvora od 20 kV do 450 kV je zbog fotoelektrične apsorpcije i Comptonovog raspršenja. Fotoelektrična apsorpcija nastaje kad se ukupna energija dolazećeg fotona rendgenske zrake prenosi na unutarnji elektron, čime se taj elektron izbacuje. Kod Comptonovog raspršenja dolazeći foton sudara se sa slobodnim ili vanjskim elektronom, izbacujući elektron. Zbog tog sudara dolazi do skretanja fotona sa svoje putanje što dovodi do gubitka energije. Kod oba uzroka dolazi do pada energije, ali znatno više kod fotoelektrične apsorpcije. Ispravna kombinacija između emitiranog spektra zračenja koji ovi o materijalu mete i apsorpcije koja ovisi o materijalu predmeta može znatno utjecati na kvalitetu CT slika, a samim time i na mjerenje. U slučaju skeniranja predmeta napravljenog od različitih materijala uporaba mete sačinjene od više materijala donosi neke prednosti.

Koeficijent prigušenja očito ograničava maksimalnu debljinu predmeta koju zraka može probiti, a time i njegovu masu i duljinu. Iskusni mjeritelji pokušavaju pronaći optimalnu orijentaciju predmeta smanjujući maksimalnu debljinu probijanja zrake ili varijacije dubine penetriranja prilikom rotacije predmeta. Optimalnom orijentacijom predmeta također treba izbjegavati da površine predmeta budu okomite na os rotacije jer zbog toga dolazi do raspršenja zrake i dovodi do otežane rekonstrukcije 3D modela [2].

5.4. Temperatura

Prilikom mjerenja dimenzija zahtijevana temperatura je 20 °C i odstupanja od ove temperature često dovode do pogrešaka. Kontrola temperature kod CT uređaja za dimenzionalna mjerenja je prilično teška iz razloga jer se na industrijskom CT uređaju nalazi više izvora toplina kao što su elektromotor, izvor zračenja, detektori itd. i svi proizvode toplinu. Ponovljiva mjerenja su moguća samo onda kad su svi nabrojani izvori toplinskog zračenja na stabilnim temperaturama uz dopuštene varijacije (0,1 do 0,5) °C. Stoga je od ključne važnosti imati temperaturno stabilni CT uređaj i omogućiti dovoljno vremena da komponente CT uređaja i predmet dosegnu uniformnu temperaturu od 20 °C [2].

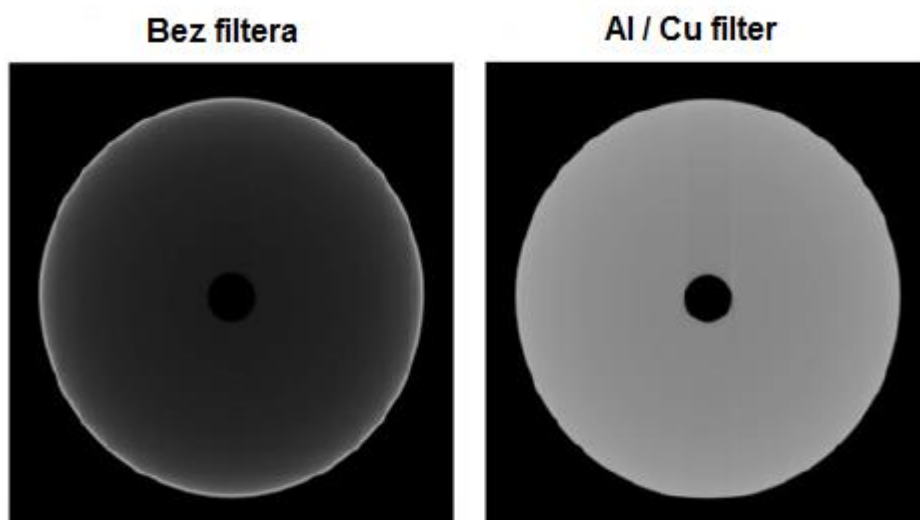
5.5. Utjecaj mjeritelja

Mjeritelj na CT uređaju može imati velik utjecaj na rezultate mjerenja. Najprije može utjecati na zagrijavanje sustava i na postizanje temperaturne ravnoteže premeta i sustava. Također prethodno podešavanje, odnosno kalibracija veličine piksela i voksel, utječe na rezultate kao i postavljanje i stezanje predmeta na okretnom stolu. Parametrizacija sustava se isto vrši od strane mjeritelja, pri čemu mu kao pomoć može poslužiti softver ili unaprijed definirani parametri za određeni zahtjeve. Ulazni podaci utječu na obnovljivost mjernih rezultata, a time i na sustavna odstupanja mjerenja. Također ima utjecaj na strategiju mjerenja. Danas se koriste dvije glavne strategije skeniranja, ovisne o vrsti detektora, a to su okretno skeniranje s pločastim detektorima gdje je predmet uvijek unutar konusnog zračenja tijekom rotacije i skeniranje po odsječcima s linijskim detektorima, gdje se predmet mjeri u jako malim odsječcima tijekom svake rotacije. Rotacija predmeta je najčešće kontinuirana ili postepena. U pravilu oba načina rotacije daju približno jednake rezultate mjerenja, ali pri bržim skeniranjima kontinuiranom rotacijom dolazi do zamagljivanja slike [2].

5.6. Ostali utjecaji na mjerenja

Dok zraka prolazi kroz apsorbirajući materijal, nisko energetske fotoni (meke zrake) puno brže oslabljuju nego visokoenergetski fotoni. Prema tome meke zrake vrlo brzo nakon prolaska kroz materijal nestaju i samo ostaju tvrde zrake koje dalje prodiru kroz materijal do detektora. Prema tome na slici izgleda da prvi milimetar predmeta apsorbira više rendgenskog zračenja nego ostatak predmeta koji uzrokuje slabljenje tvrdog zračenja. Ovaj efekt jasno se vidi na slici 14, gdje je vanjski rub predmeta svjetliji od ostatka što ima za uzrok utjecaj na

detekciju ruba i prepoznavanje različitih materijala u slučaju predmeta koji se sastoji od više različitih materijala. Da bi se taj nedostatak uklonio, stavlja se tanka pločica od bakra ili aluminija između izvora i predmeta kako bi upila meke rendgenske zrake čime bi se mjerenje obavilo samo tvrdim zrakama. Primjenom filtera omogućena je ispravna detekcija ruba. Uporaba filtera ima prednosti ima i mane. Mana je ta da korištenjem tanke pločice pada intenzitet zračenja te izloženost predmeta i vrijeme mjerenja rastu.



Slika 14. Prednost korištenja filtera [2]

Slika 14 prikazuje kako se primjenom odgovarajućeg filtera prethodno uklone meke zrake što u konačnici omogućava bolju detekciju rubova predmeta.

Mnogi softveri za rekonstrukciju 3D modela sadrže različite algoritme koji numeričkim metodama nastoje ispraviti ovu smetnju. Osim ovog nedostatka, postoji još znatan broj njih, ali se najčešće smanjuje njihov utjecaj modificiranjem procesa mjerenja [2].

5.7. Mjeriteljska sljedivost

Sljedivost se definira kao svojstvo mjernog rezultata kojim se taj rezultat dovodi u vezu s navedenom referencijom dokumentiranim neprekinutim lancem umjeravanja, od kojih svako doprinosi utvrđenoj mjernoj nesigurnosti [15].

Kao što je prethodno navedeno da na rezultate mjerenja na CT uređajima djeluje velik broj utjecajnih faktora pa se mjerna nesigurnost ne može točno definirati, zbog toga je gotovo nemoguće osigurati sljedivost rezultata mjerenja do vrha hijerarhije umjeravanja, odnosno do definicije mjerene jedinice u ovom slučaju metra. Dakle, da bi rezultati dobiveni mjerenjem

CT uređajem bili sljedivi, potrebno je da utvrđene vrijednosti svakog pojedinačnog utjecajnog parametra budu sljedivi do definicije metra ili referencijskog etalona. Metoda rješavanja problema sljedivosti kod CT uređaja je korištenje već umjerenih predmeta te analiza i određivanje količine utjecaja koji su uzrok pogrešaka kod mjerenja na CT uređaju. Ako se pogreške mjerenja mogu definirati kao sustavne, njihov utjecaj se u tom slučaju može umanjiti korekcijom rezultata mjerenja. Razlog zbog kojeg se mogu minimizirati leži u tome da su pogreške ako su sustavne, onda su i ponovljive pa se stoga prilikom ponavljanja mjerenja javljaju u istom iznosu i smjeru.

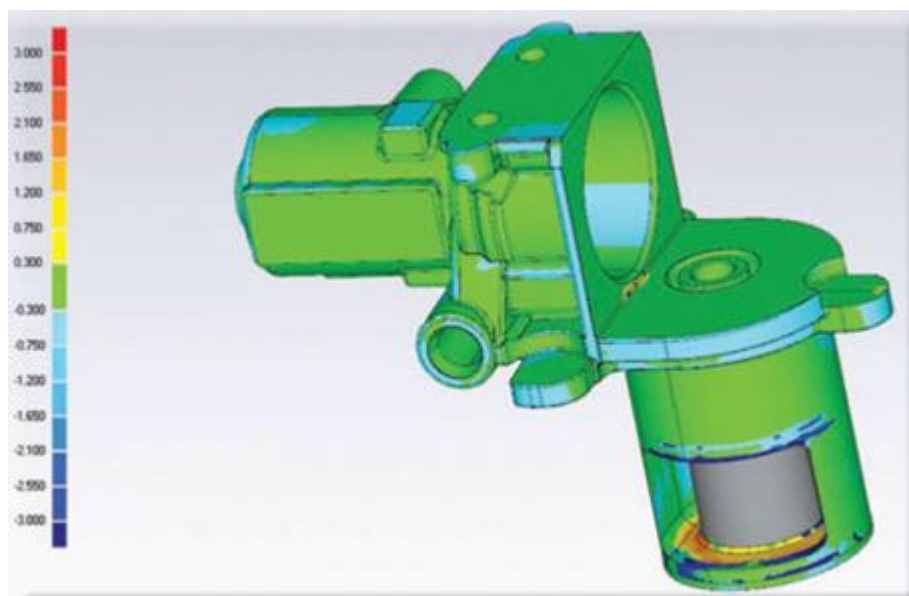
U cilju osiguravanja sljedivosti rezultata mjerenja na CT uređajima potrebno je [16]:

1. Provesti modeliranje etalona za umjeravanje CT uređaja.
2. Istražiti utjecajne parametre.
3. Provesti karakterizaciju materijala kako bi se utvrdio utjecaj različitih materijala na rezultate mjerenja.
4. Utvrditi mogućnosti mjerenja na CT uređaju usporedbom s rezultatima mjerenja na trokoordinatnom mjernom uređaju.
5. Primijeniti nove metode procjene mjerne nesigurnosti.

6. PRIMJENA RAČUNALNE TOMOGRAFIJE

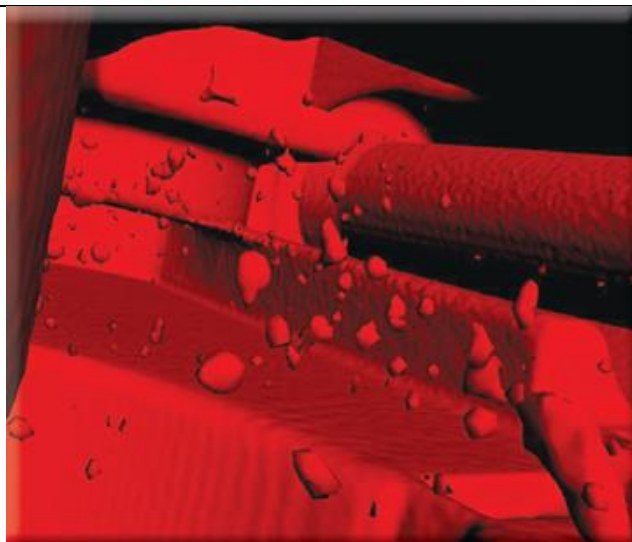
Najčešći zahtjevi za primjenom računalne tomografije su [1]:

- Rekonstrukcija CAD modela predmeta
- Usporedba stvarnog predmeta s njegovim CAD modelom
- Ispitivanje materijala (unutarnje strukture)
- Analiza sklopova bez potrebe rastavljanja sklopa
- Povratno inženjerstvo



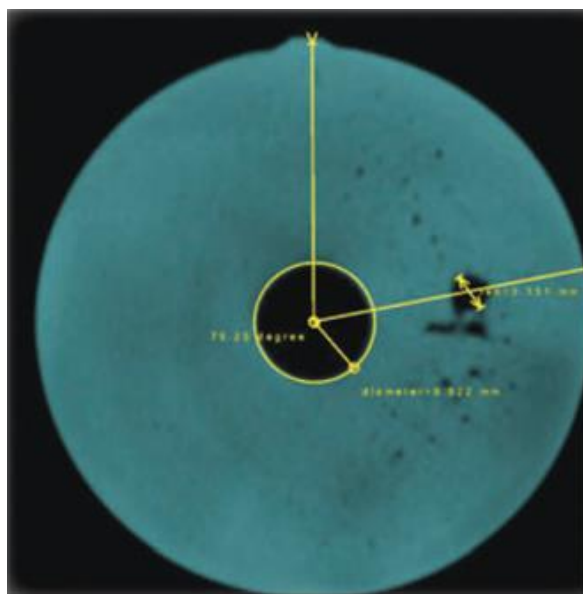
Slika 15. Dimenzionalna usporedba sa 3D modelom [1]

Slika 15 prikazuje usporedbu CT rekonstruirane površine s CAD modelom. Kako bi se ona mogla provesti, ta dva modela moraju se preklapati. Sve dimenzionalne razlike prikazane su u različitim bojama. Tolerancije u granicama od - 0,300 mm do + 0,300 mm su zelene boje. Žuta predstavlja područja gdje je izmjerena veća vrijednost od CAD modela, a plava manje vrijednosti.



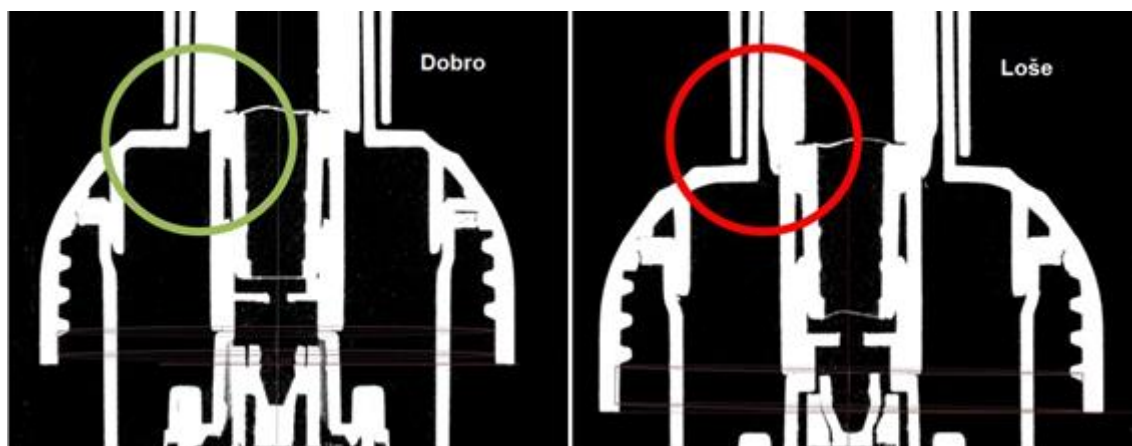
Slika 16. Ispitivanje strukture materijala [1]

Slika 16 jasno prikazuje uključine (mjehuriće) nastale lijevanjem unutar materijala. Razlog nastanka mjehurića mogu biti krivo podešeni tehnološki parametri, a posljedica njihovog postojanja je slabija struktura tog materijala. Iako izvana sve izgleda da je u redu, razlike u čvrstoći odljevaka mogu značajno varirati.



Slika 17. Presječena ravnina [1]

Slika 17 prikazuje mogućnost dimenzionalnog mjerenja iz ravnine dobivene presijecanjem modela na željenom mjestu. To omogućava mjerenje duljine, promjera ili kuta u željenom presjeku bez potrebe za razaranjem predmeta.



Slika 18. Analiza sklopa [17]

Slika 18 prikazuje dvije pumpe gdje jedna radi ispravno, a druga ne. CT skeniranje omogućuje analizu sklopa kako bi se pronašao nedostatak bez potrebe za njegovim rastavljanjem.

6.1. Prednosti i nedostaci računalne rendgenske tomografije

Primjena industrijskih CT uređaja ima mnoge prednosti u odnosu na ostale metode, ali ipak sadrži i znatan broj nedostataka jer se i dalje ne mogu točno definirati i odrediti utjecajni parametri na mjernu nesigurnost, odnosno ne postoji zajednički faktor korekcije vrijednosti koji bi bio adekvatan za svako pojedino mjerenje. U nastavku su navedene prednosti i nedostaci primjena CT uređaja.

Prednosti primjene CT uređaja [18]:

- Metoda spada pod nerazorna ispitivanja
- Kratko vrijeme skeniranja predmeta
- Određivanje unutarnje i vanjske geometrije
- Smanjenje troškova analize predmeta
- Jednostavnost provođenja procesa povratnog inženjerstva
- Beskontaktna metoda

Nedostatci primjene CT uređaja [18]:

- Velik broj utjecajnih parametara na rezultate
- Ne postoje standardne procedure ispitivanja
- Problem skeniranja predmeta sastavljenih od više vrsta materijala različitih gustoća
- Neprocijenjena mjerna nesigurnost
- Sljedivost do definicije metra nije osigurana

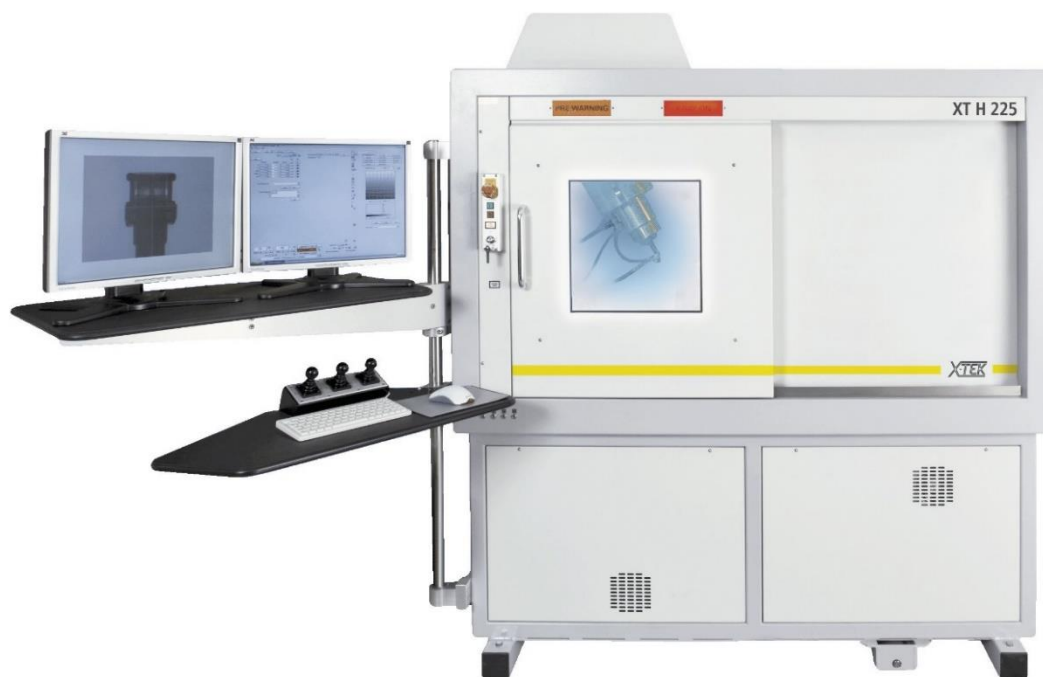
7. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj ovog rada je analizirati utjecaj prilagodbe različitih matematičkih modela podacima dimenzionalnih mjerenja kod računalne tomografije. S obzirom na to da svaki mjeritelj zasebno može odabrati metodu prilagodbe modela to u konačnici može rezultirati različitim vrijednostima dimenzionalnih mjerenja.

Uređaj koji se koristio za provedbu mjerenja je industrijski CT uređaj za dimenzionalna mjerenja Nikon XT H 225 koji se nalazi u laboratoriju za mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

7.1. Nikon CT H 225

CT uređaj Nikon XT H 225 odlikuje fleksibilnost te se koristi u različitim granama industrije (zahtjevi za primjenom su navedeni u prethodnom poglavlju). U auto industriji koristi se za kontrolu električnih konektora, senzora (npr. lambda sonda), pumpi goriva, filtera itd. U zrakoplovnoj industriji primjenjuje se najčešće za analizu zavora, kontrolu lopatica turbine, pregleda komponenti i sl. Osim toga primjenjuje se i u farmaceutskoj/ medicinskoj industriji te raznim arheološkim i paleontološkim istraživanjima.



Slika 19. Nikon XT H 225 [19]

Slika 19 prikazuje CT uređaj na kojem su obavljena mjerenja u svrhu ovog rada. Na slici je vidljivo da se uz uređaj nalazi integrirana upravljačka jedinica koja dolazi zajedno s uređajem. Razlog fleksibilnost uređaja leži u tome da ima mogućnost izmjene pločastog detektora ili mete kako bi prilagodio rezoluciju prema potrebama korisnika. Osim fleksibilnosti ovaj uređaj karakterizira i jednostavnost korištenja te niži troškovi održavanja [20].

Prema tome glavne prednosti ovog uređaja su [20]:

- Sigurnost
- Pruža visokokvalitetne slike
- Mogućnost automatizacije
- Jednostavno korištenje

U tablici 1 prikazane su specifikacije CT uređaja Nikon XT H 225.

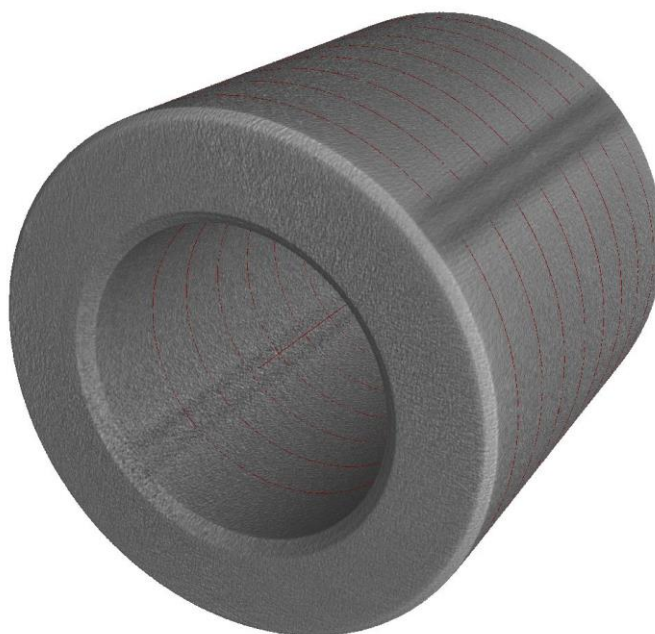
Tablica 1. Specifikacije uređaja [21]

| | |
|----------------------------------|---|
| <i>Dimenzija:</i> | 1830 mm x 875 mm x 1987 mm |
| <i>Ukupna masa:</i> | 2400 kg |
| <i>Najveći napon:</i> | 225 kV |
| <i>Najveća snaga:</i> | 225 W |
| <i>Meta:</i> | Refleksijska |
| <i>Detektor:</i> | Varian 2520 |
| <i>Veličina piksela:</i> | 127 μ m |
| <i>Broj osi:</i> | 5 |
| <i>Radni hod:</i> | 185 mm x 250 mm x 700 mm Rotacija: 360 ° |
| <i>Maksimalna težina uzorka:</i> | 15 kg |

7.1.1. Korišteni Softver

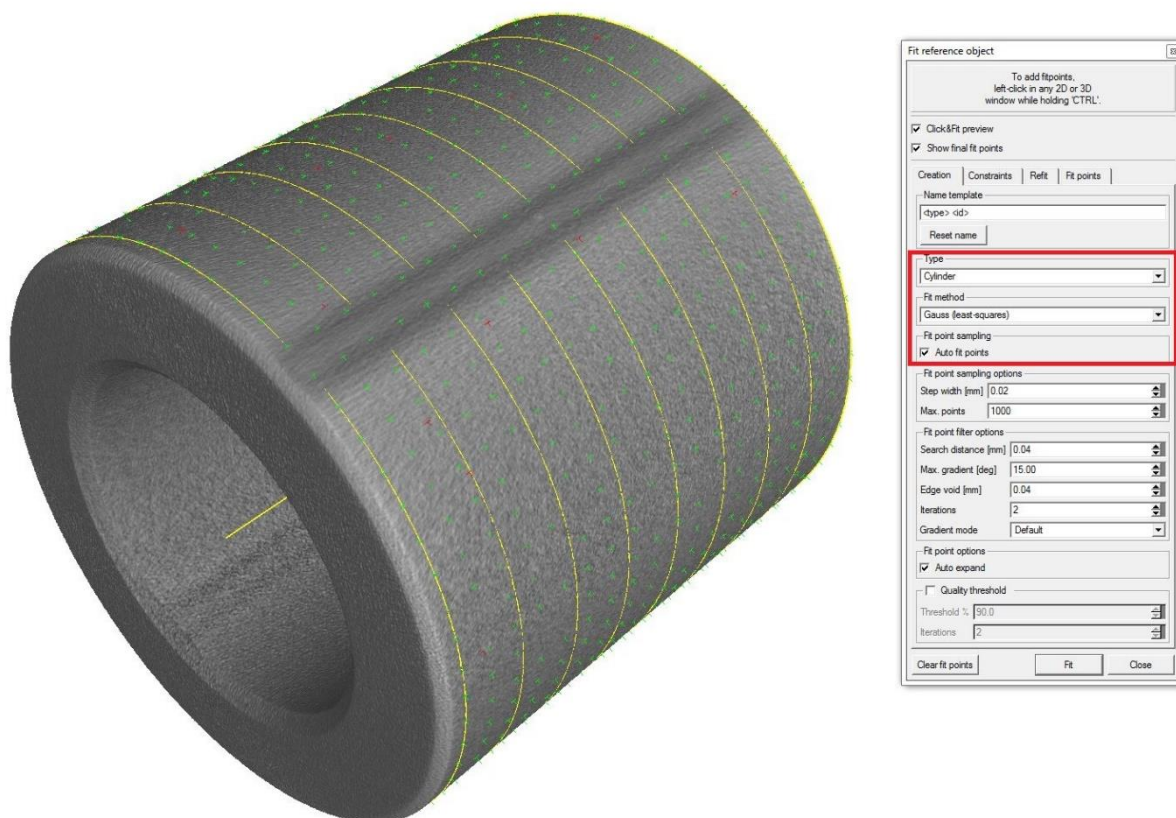
U radu su korištena tri softvera: Inspect-X, 3D CT Pro i VGStudio MAX 2.2.

Inspect-X je softver koji se nalazi na računalu na samom CT uređaju. U njemu se podešavaju parametri skeniranja, a to su: napon, struja, pozicija okretnog stola, broj projekcija itd. Odlikuje ga jedan od najbržih rekonstrukcijskih algoritama na svijetu i jednostavno korisničko sučelje. Za izradu trodimenzionalnog modela korišten je softver 3D CT Pro te na kraju za dimenzionalna mjerenja VGStudio MAX 2.2. Za izradu modela mogu se koristiti i neki drugi softveri, no preporuka od proizvođača je korištenje navedenih.



Slika 20. Rekonstruirani 3D model

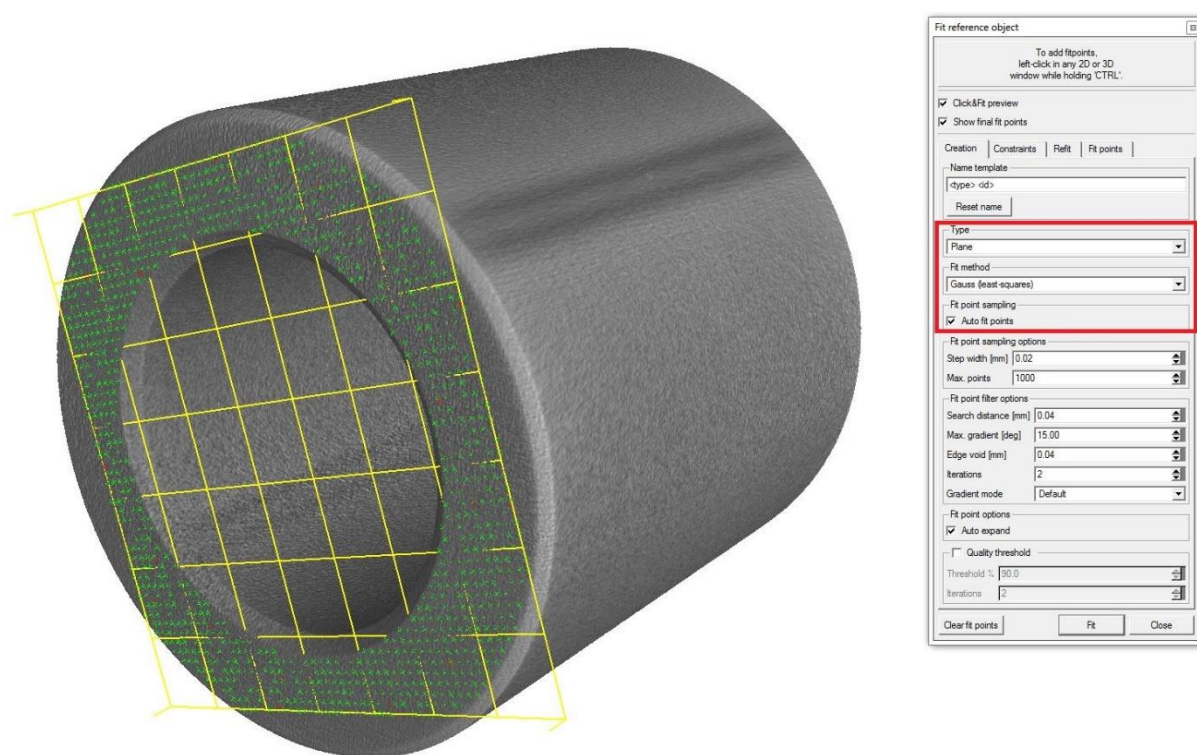
Slika 20 prikazuje rekonstruirani 3D model cilindra dobiven korištenjem softvera 3D CT Pro na temelju 1000 rendgenskih slika uhvaćenih rotacijom cilindra za 360 °. Osim što prikazuje vanjsku strukturu cilindra, rekonstruirani model sadrži i sve podatke vezane za unutarnju strukturu materijala. Model je moguće presjeći u bilo kojoj točki kako bi se dobila presječna ravnina na kojoj je moguće obaviti potrebna mjerenja ili samo kontrola unutarnje strukture.



Slika 21. Odabir metoda prilagodbe modela za mjerenje promjera

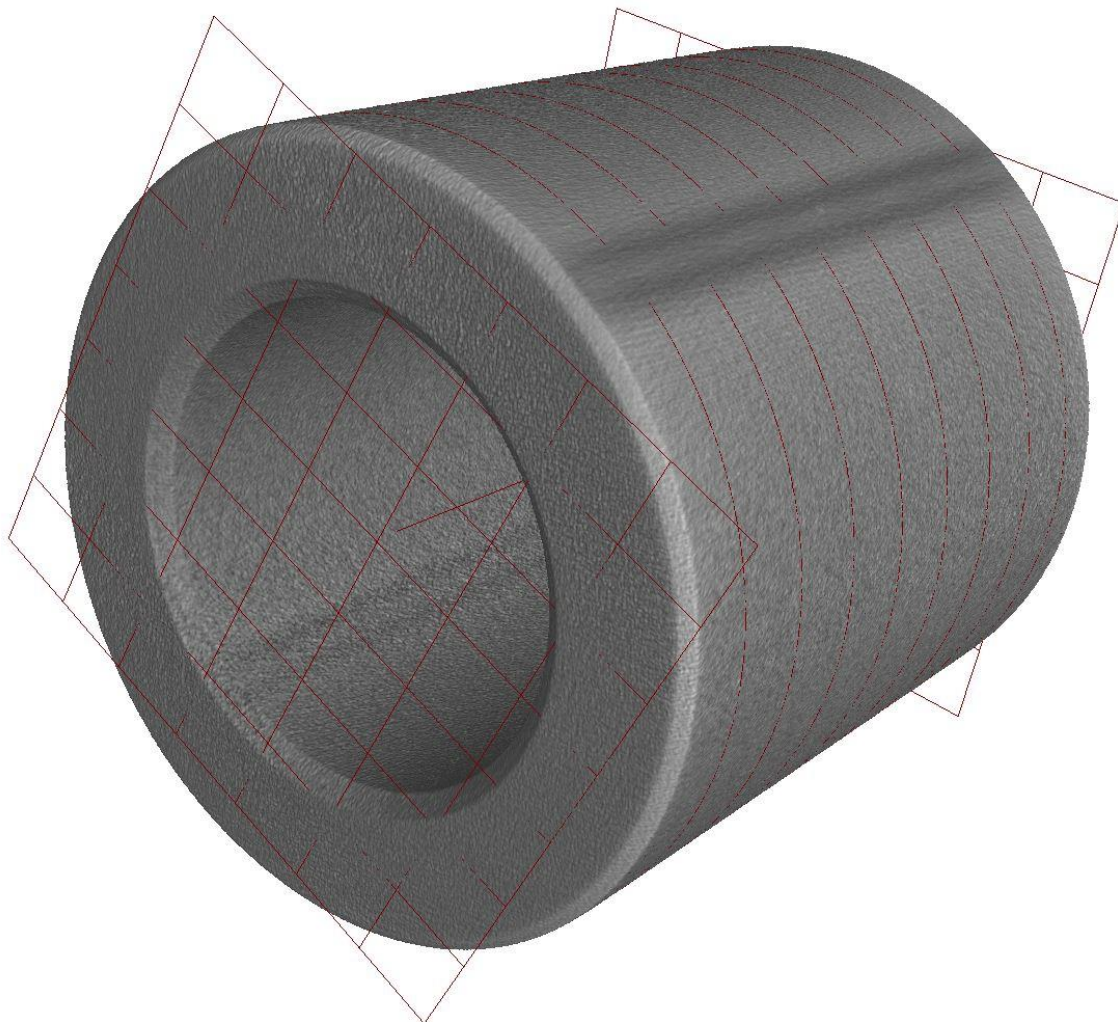
Slika 21 prikazuje mogućnost odabira metode prilagodbe modela za mjerenje vanjskog promjera cilindra. U označenom crvenom pravokutniku odabire se najprije oblik površine (cilindar) te se nakon toga odabire željena metoda prilagodbe modela (u ovom slučaju je odabrana Gaussova metoda). Osim toga potrebno je na plaštu cilindra označiti nekoliko točaka kako bi softver mogao na temelju njih pronaći funkciju koja opisuje (aproksimira) taj skup točaka s obzirom na odabranu metodu prilagodbe.

Metode prilagodbe su opisane u sljedećem podnaslovu.



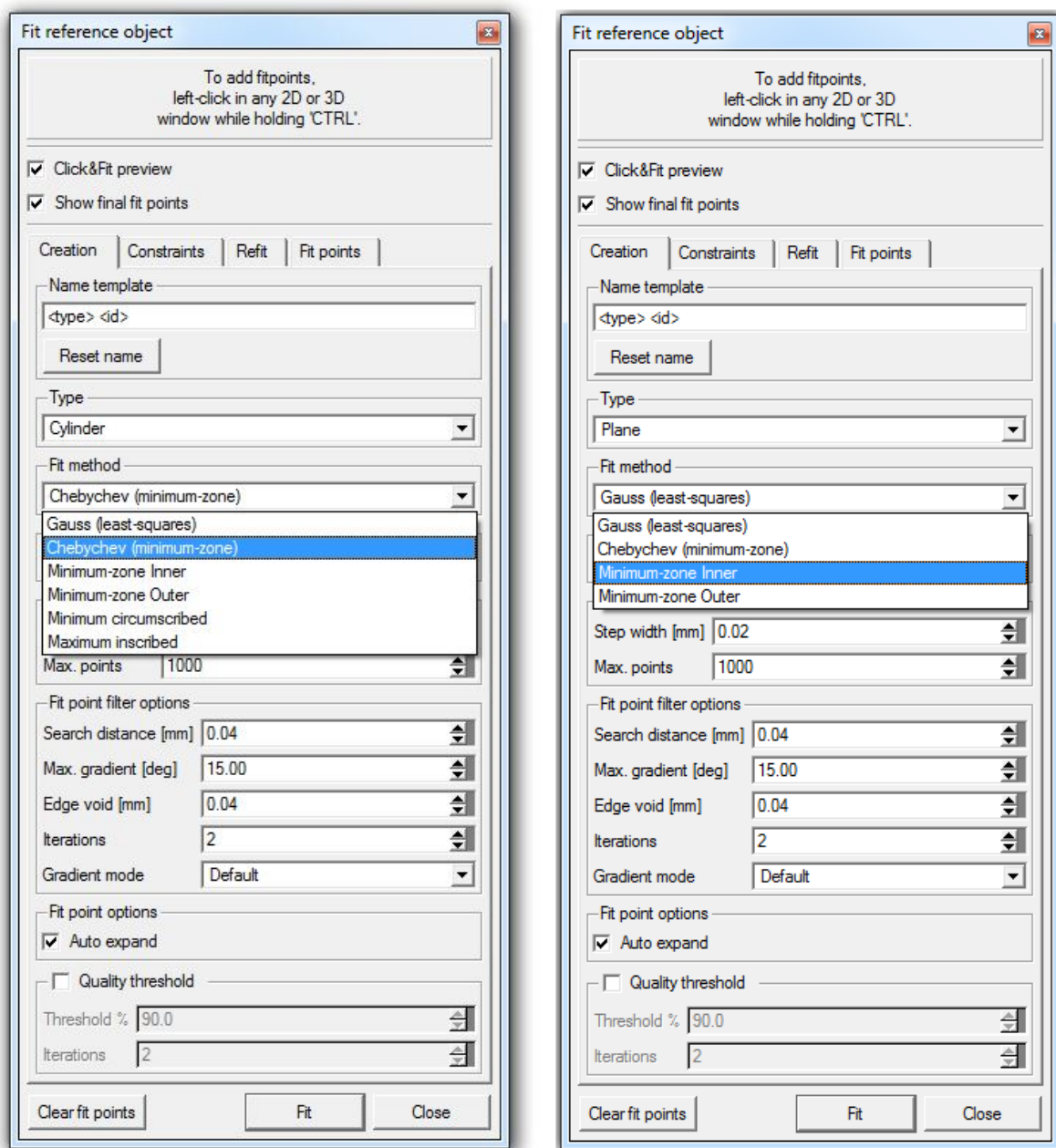
Slika 22. Odabir metoda prilagodbe modela za mjerenje duljine

Slika 22 prikazuje mogućnost odabira metode prilagodbe modela za mjerenje duljine (visine) cilindra. U označenom crvenom pravokutniku odabire se najprije oblik površine (ravna ploha) te se nakon toga odabire željena metoda prilagodbe modela (u ovom slučaju je odabrana Gaussova metoda). Potrebno je označiti nekoliko točaka (najmanje 3) na bazi cilindra koje ne leže na istom pravcu kako bi se odredila ravnina.



Slika 23. Aproximirane ravnine za mjerenje paralelnosti

Slika 23 prikazuje dvije dobivene ravnine na bazama cilindra na temelju kojih softver računa paralelnost tih dviju ravnina. Paralelnost je moguće odrediti za konuse, cilindre, linije i ravnine. Tolerancijska zona je cilindrična ili ravninska, definirana s udaljenosti između ravnine i promjera cilindra, odnosno tolerancijom.



Slika 24. Odabir metode prilagodbe modela

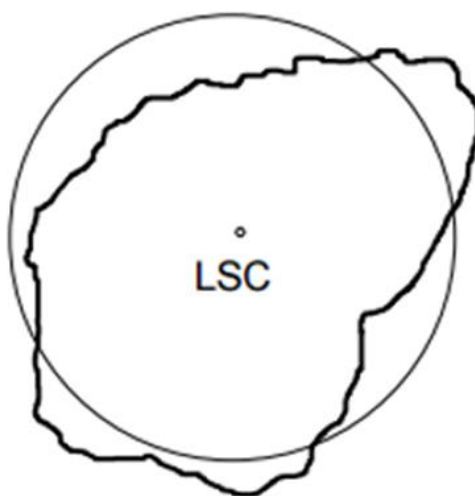
Slika 24 prikazuje koje se metode prilagodbe modela mogu koristiti s obzirom na oblik površine. Na lijevoj slici vidljivo je kako se pri mjerenju promjera cilindra mogu koristiti sve metode, dok se kod mjerenja duljine ili paralelnosti mogu koristiti samo četiri metode prilagodbe modela. Metode najveće upisane kružnice i najmanje opisane kružnice ne mogu se koristiti u tom slučaju.

7.2. Metode prilagodbe modela

Softver VGStudio MAX 2.2 pruža mogućnost odabira između više metoda prilagodbe modela za dimenzionalna mjerenja. Svaka metoda se temelji na različitim matematičkim postupcima aproksimacije točaka i dobivaju se različite funkcije koje najbolje opisuje zadani problem s obzirom na odabranu metodu. Kako je svaka funkcija aproksimacije različita, različiti će u konačnici biti i rezultati mjerenja za svaku pojedinu metodu. U nastavku su ukratko objašnjene metode koje se mogu odabrati u softveru VGStudio MAX 2.2.

7.2.1. Gaussova metoda ili kružnica najmanjih kvadrata

Gaussova metoda minimizira sumu kvadrata svih odstupanja svih relevantnih dodijeljenih točaka prema dodijeljenom referentnom objektu. U slučaju velikog broja dodijeljenih točaka distribucija odstupanja najčešće rezultira u obliku Gaussove krivulje. Kod ove metode referentni objekt je tako pozicioniran da je suma negativnih odstupanja jednaka sumi pozitivnih odstupanja [22].



Slika 25. Gaussova metoda [23]

Slika 25 prikazuje dobivenu aproksimaciju kružnice korištenjem Gaussove metode. Koordinate središta i polumjer kružnice najmanjih kvadrata dobivaju se pomoću sljedećih formula [23]:

$$e_x = \frac{2 \sum x_i}{n} \quad (1)$$

$$e_y = \frac{2 \sum y_i}{n} \quad (2)$$

$$R = \frac{\sum r_i}{n} \quad (3)$$

gdje su:

n - broj dodijeljenih točaka

x_i, y_i - koordinate dodijeljenih točaka

r_i - udaljenost dodijeljenih točaka od središta kružnice najmanjih kvadrata

Funkcija cilja glasi [24]:

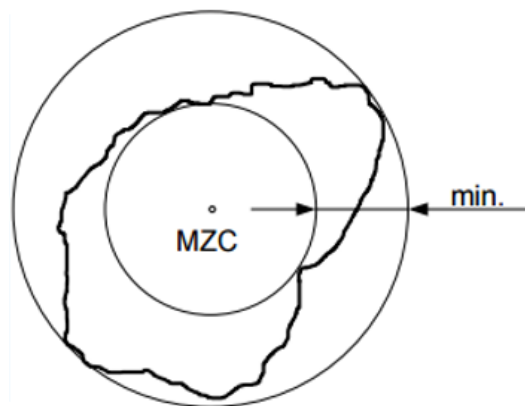
$$F(x_c, y_c, R_c) = \text{Min}(\sum_{i=1}^n R_i^2) \quad (4)$$

Gaussova metoda se može koristiti za sve vrste oblika referentnih objekata [22].

7.2.2. Chebysheva metoda ili metoda najmanje kružne zone

Chebysheva metoda dodjeljuje dva središnja referentna objekta postojećem oblaku točaka. Oba referentna objekta su dodijeljena prema ekstremnim minimalnim i maksimalnim vrijednostima opsega svih dodijeljenih točaka (upisani referentni objekt u odnosu na upisane dodijeljene točke i obrnuto) tako da je razmak između referentnih objekata minimalan. Kod ove metode postoje uvjeti referentnih objekata:

- Za mjerenje ravnina ili linija dva središnja referentna objekta moraju biti paralelni.
- Za mjerenje kružnica ili sfera središta osi referentnih objekata se moraju poklapati.
- Za mjerenje cilindara i konusa središnje osi referentnih objekata moraju biti jednake.



Slika 26. Chebysheva metoda [23]

Slika 26 prikazuje dobivenu aproksimaciju korištenjem Chebysheve metode. Procjenjivanje odstupanja od kružnosti u ovom slučaju se radi na temelju određivanja središta dviju kružnica koje u potpunosti obuhvaćaju profil plašta cilindra.

Funkcija cilja glasi [24]:

$$F(x_c, y_c) = \text{Min} \{ [R_i]_{\max} - [R_i]_{\min} \} \quad (5)$$

Odnos veličina odstupanja dobivenih na temelju Gaussove i Chebysheve metode ne može biti manja od 1, a vrlo često prelazi 1,3 [23].

$$1 \leq \frac{LSC}{MZC} \leq 1,3$$

Chebysheva metoda se može koristiti za referentne objekte u obliku kružnice, ravnine, sfere, cilindra i konusa [22].

7.2.3. Metoda najmanje unutarnje zone

Metoda najmanje unutarnje zone omogućuje korištenje unutarnjih središnjih referentnih objekata (upisanih referentnih objekata) za računanje najmanje kružne zone. Unutarnji referentni objekt je smješten na bližoj udaljenosti od površine materijala relativno u odnosu najmanje zone referentnog objekta.

Metoda najmanje unutarnje zone se može koristiti za referentne objekte u obliku kružnice, ravnine, sfere, cilindra i konusa [22].

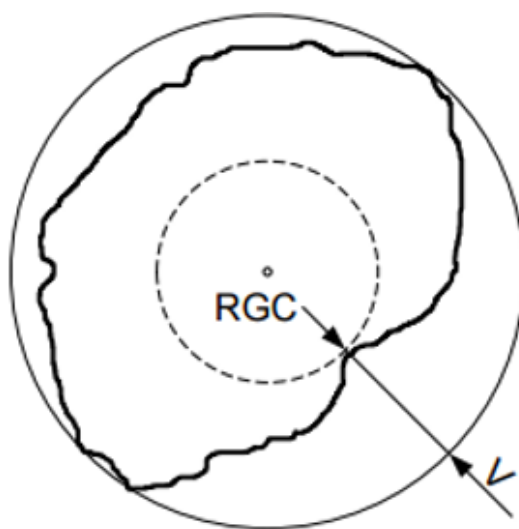
7.2.4. Metoda najmanje vanjske zone

Metoda najmanje vanjske zone omogućuje korištenje vanjskih središnjih referentnih objekata (upisanih dodijeljenih točaka) za računanje najmanje kružne zone. Vanjski referentni objekt je smješten na većoj udaljenosti od površine materijala relativno u odnosu najmanje zone referentnog objekta.

Metoda najmanje unutarnje zone se može koristiti za referentne objekte u obliku kružnice, ravnine, sfere, cilindra i konusa [22].

7.2.5. Metoda najmanje opisane kružnice

Metoda najmanje opisane kružnice dodjeljuje referentni objekt prema ekstremnoj minimalnoj vrijednosti dodijeljenih točaka (najmanji referentni objekt s obzirom na sve dodijeljene točke). Kod ove metode nisu postavljeni uvjeti za položaj središta referentnog objekta.



Slika 27. Metoda najmanje opisane kružnice [23]

Slika 27 prikazuje dobivenu aproksimaciju korištenjem metode najmanje opisane kružnice. To je najmanja kružnica koja potpuno obuhvaća izmjereni profil. Veličina odstupanja od kružnosti jednaka je udaljenosti najbliže točke središtu kružnice do opisane kružnice, odnosno $P + V$ gdje je $P = 0$ [23].

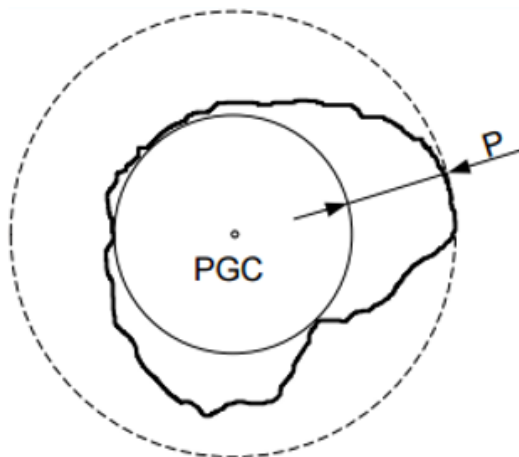
Funkcija cilja glasi [24]:

$$F(x_c, y_c) = \text{Min} \{ \text{Max} [R_i] \} \quad (6)$$

Metoda najmanje opisane kružnice se može koristiti za referentne objekte samo u obliku kružnice, sfere i cilindra [22].

7.2.6. Metoda najveće upisane kružnice

Metoda najveće upisane kružnice dodjeljuje referentni objekt prema ekstremnoj maksimalnoj vrijednosti dodijeljenih točaka (najveći referentni objekt s obzirom na sve dodijeljene točke). Kod ove metode nisu postavljeni uvjeti za položaj središta referentnog objekta.



Slika 28. Metoda najveće upisane kružnice [23]

Slika 28 prikazuje dobivenu aproksimaciju korištenjem metode najveće upisane kružnice. To je najveća upisana kružnica unutar izmjereneog profila. Veličina odstupanja od kružnosti jednaka je udaljenosti najudaljenije točke od središta kružnice do upisane kružnice, odnosno $P + V$ gdje je $V = 0$ [23].

Funkcija cilja glasi [24]:

$$F(x_c, y_c) = \text{Max}\{\text{Min}[R_i]\} \quad (7)$$

Metoda najveće upisane kružnice se može koristiti za referentne objekte samo u obliku kružnice, sfere i cilindra [22].

7.3. Dimenzijska analiza

Metode prilagodbe modela ispitivane su mjerenjima na cilindru. Mjerenja su provedena na uređaju Nikon XT H 225, te su korišteni za podešavanje parametara skeniranja, izradu modele i dimenzionalna mjerenja prethodno navedeni softveri.

Parametri skeniranja podešeni su u softveru Inspect-X i prikazani su u sljedećoj tablici. Parametri su konstantni za sva mjerenja.

Tablica 2. Parametri skeniranja

| Napon | Jakost struje | Broj projekcija | X - os | Y - os | Z - os |
|--------|---------------|-----------------|--------|--------|--------|
| 130 kV | 30 μ A | 1000 | 0 | 170 mm | 200 mm |

Značajke koje su se ispitivale primjenom različitih modela su vanjski promjer cilindra, unutarnji promjer, duljina i paralelnost.

U tablici 3 prikazani su rezultati mjerenja značajki cilindra s obzirom na odabranu metodu prilagodbe modela.

Tablica 3. Rezultati mjerenja različitim metodama

| | Unutarnji promjer | Vanjski promjer | Duljina | Paralelnost |
|---------------------------------------|----------------------|----------------------|----------|-------------|
| | \varnothing_u , mm | \varnothing_v , mm | l , mm | //, mm |
| Gaussova metoda | 12,04 | 20,09 | 20,09 | 0,07 |
| Chebysheva metoda | 12,04 | 20,09 | 20,06 | 0,05 |
| Metoda najmanje unutarnje kružne zone | 12,10 | 20,05 | 19,99 | 0,06 |
| Metoda najmanje vanjske kružne zone | 12,00 | 20,16 | 20,14 | 0,08 |
| Metoda najmanje opisane kružnice | 12,08 | 20,16 | - | - |
| Metoda najveće upisane kružnice | 11,99 | 20,06 | - | - |

Iz tablice 3 vidljivo je da se primjenom različitih metoda prilagodbe modela dobivaju i različite vrijednosti mjerenih dimenzija.

U tablici 4 su prikazane referentne vrijednosti cilindra.

Tablica 4. Referentne vrijednosti cilindra

| \varnothing_u | \varnothing_v | l | // |
|-----------------|-----------------|-----------|----------|
| 12,026 mm | 20,102 mm | 20,078 mm | 0,012 mm |

7.4. Obrada rezultata mjerenja

Na temelju prethodno dobivenih rezultata mjerenja, rezultate je potrebno obraditi kako bi se na temelju njihove interpretacije mogli donijeti određeni zaključci.

7.4.1. Izračun odstupanja

Odstupanje se definira kao razlika izmjerene vrijednosti i njene referentne vrijednosti [25].

Odstupanja rezultata mjerenja dimenzionalnih i geometrijskih značajki s obzirom na primijenjenu metodu prilagodbe modela prikazani su u sljedećoj tablici.

Tablica 5. Odstupanja od referentnih vrijednosti

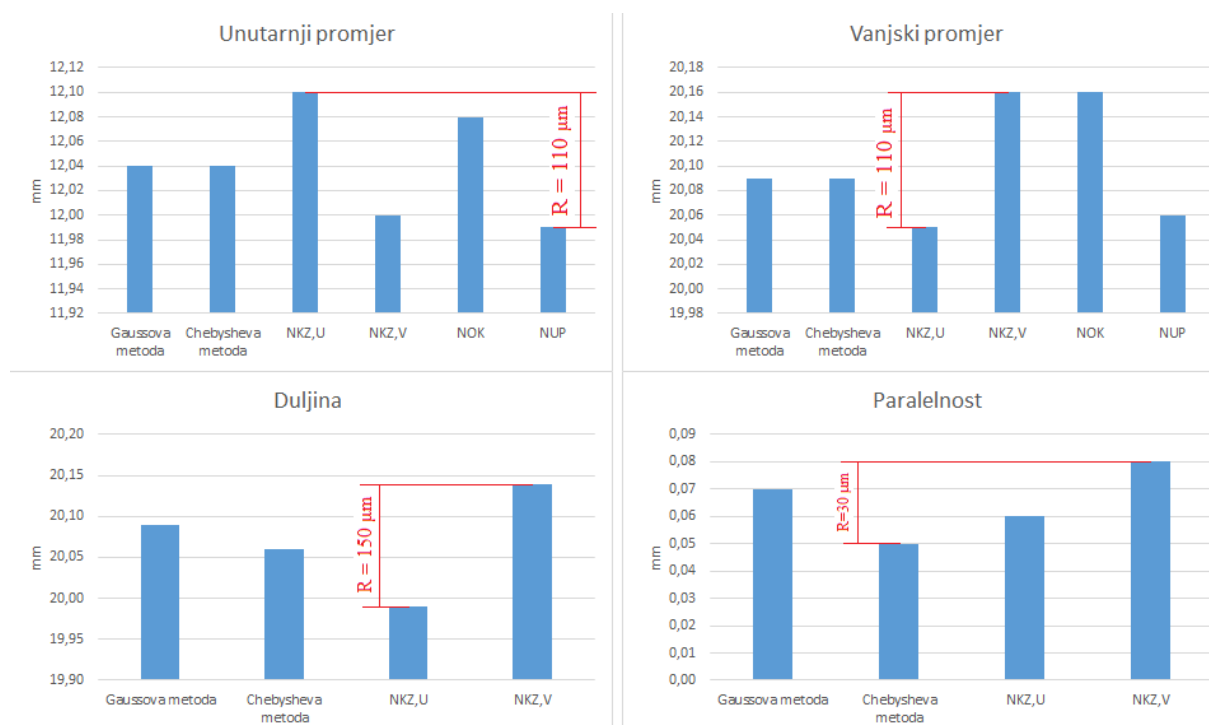
| | \varnothing_u , mm | \varnothing_v , mm | l , mm | //, mm |
|--|----------------------|----------------------|----------|--------|
| Gaussova metoda | 0,014 | -0,012 | 0,012 | 0,058 |
| Chebysheva metoda | 0,014 | -0,012 | -0,018 | 0,038 |
| Metoda najmanje unutarnje kružne zone | 0,074 | -0,052 | -0,088 | 0,048 |
| Metoda najmanje vanjske kružne zone | -0,026 | 0,058 | 0,062 | 0,068 |
| Metoda najmanje opisane kružnice | 0,054 | 0,058 | - | - |
| Metoda najveće upisane kružnice | -0,036 | -0,042 | - | - |
| Napomena: ODSTUPANJE = IZMJERENO (CT) - REFERENTNA VRIJEDNOST | | | | |

Na temelju prethodne tablice moguće je izračunati raspon rezultata mjerenja. Raspon mjerenja se definira kao apsolutna vrijednost razlike najvećeg i najmanjeg rezultata u skupini [25]. Prema tome rasponi su sljedeći.

Tablica 6. Raspon rezultata mjerenja

| | |
|-----------------|---|
| \varnothing_u | $R_u = 0,074 - (-0,036) = 110 \text{ } \mu\text{m}$ |
| \varnothing_v | $R_v = 0,058 - (-0,052) = 110 \text{ } \mu\text{m}$ |
| l | $R_l = 0,062 - (-0,088) = 150 \text{ } \mu\text{m}$ |
| // | $R_{//} = 0,068 - 0,038 = 30 \text{ } \mu\text{m}$ |

Iz prethodne tablice vidi se kako raspon rezultata mjerenja unutarnjeg i vanjskog promjera iznosi 110 μm . Kod mjerenja duljine raspon rezultata iznosi 150 μm što je dosta široko područje raspona vrijednosti rezultata i to samo zbog odabira različitih metoda prilagodbe modela. Pri mjerenju paralelnosti rezultati se nalaze u rasponu od 30 μm . Ne postoje norme koje kažu da se za određeni predmet mjerenja ili određenu dimenziju koristi određena metoda prilagodbe pa zbog toga i dolazi do ovolikih vrijednosti raspona rezultata mjerenja.



Slika 29. Raspon rezultata mjerenja

Slika 29 grafički prikazuje prethodno izračunate raspone rezultata mjerenja s obzirom na odabrane metode prilagodbe modela.

7.4.2. Analiza varijance

U radu je provedena analiza varijance rezultata mjerenja. Analiza varijance je niz postupaka kojima provjeravamo značajnost razlika između različitih situacija ili uzoraka kao i njihov odnos [27]. Korišteni softver za provedbu analize je Minitab 17 (probna verzija).

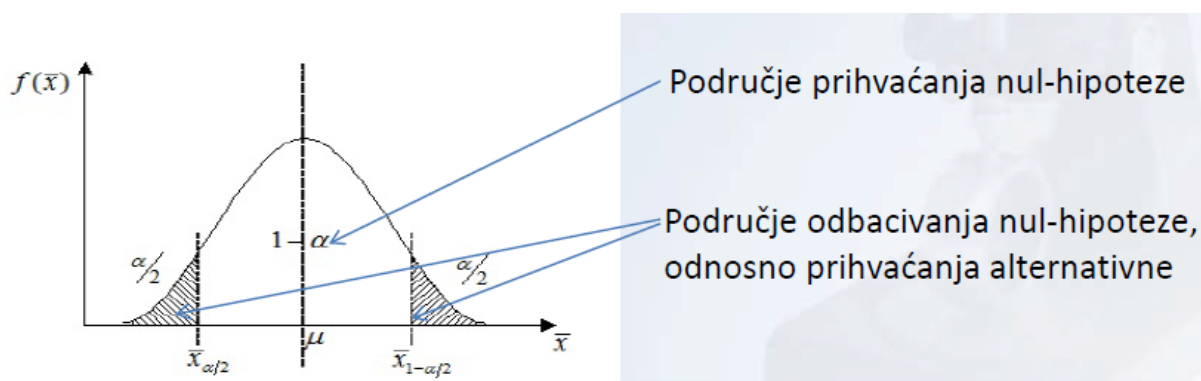
Izračun statističkog testa se temelji na statističkoj hipotezi. Potrebno je postaviti nultu hipotezu H_0 koju testiramo te alternativnu hipotezu H_1 . Zatim se provodi testiranje hipoteze kojim se određuje da li i koliko pouzdano raspoloživi podaci podupiru postavljenu pretpostavku. Uvijek testiramo nultu hipotezu te ona govori o nepostojanju razlike između podataka. Alternativna hipoteza je suprotna nultoj, odnosno to je hipoteza o postojanju razlike.

Postavljanje hipoteza:

$$\begin{aligned} H_0: \Delta \bar{x}_1 &= \Delta \bar{x}_2 \\ H_1: \Delta \bar{x}_1 &\neq \Delta \bar{x}_2 \end{aligned} \quad (8)$$

Postavljene su hipoteze da se odstupanja značajno ne razlikuju i da se značajno razlikuju. Sljedeći korak je izbor razine značajnosti (α). Razina značajnosti testa je granična vjerojatnost uz koju još uvijek valja prihvatiti eventualno istinitu nultu hipotezu [26]. Razina značajnosti određuje površinu ispod distribucijske krivulje statističkog testa i iznad horizontalne osi u području odbacivanja H_0 .

Veličina razine značajnosti govori o tome u kojem postotku si istraživač dopušta načiniti grešku odbacivanja istinite nulte hipoteze. Najčešća vrijednost razine značajnosti iznosi $\alpha = 0,05$ [26].



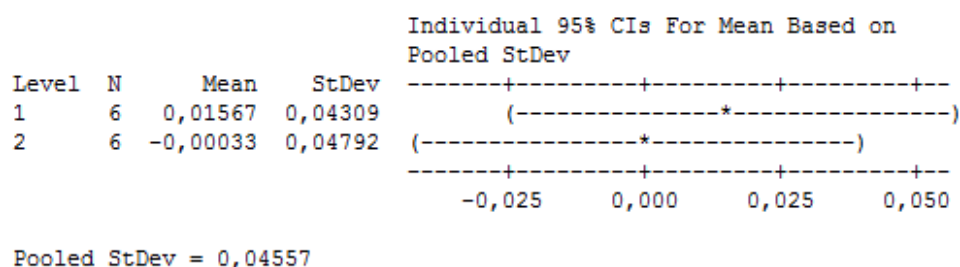
Slika 30. Razina značajnosti testa (α) [26]

Slika 30 prikazuje područje prihvaćanja, odnosno odbacivanja nulte hipoteze.

One-way ANOVA: C1 versus C2

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|--------|----|---------|---------|------|-------|
| C2 | 1 | 0,00077 | 0,00077 | 0,37 | 0,557 |
| Error | 10 | 0,02077 | 0,00208 | | |
| Total | 11 | 0,02153 | | | |

S = 0,04557 R-Sq = 3,57% R-Sq(adj) = 0,00%



Slika 31. Usporedba odstupanja vanjskih i unutarnjih promjera

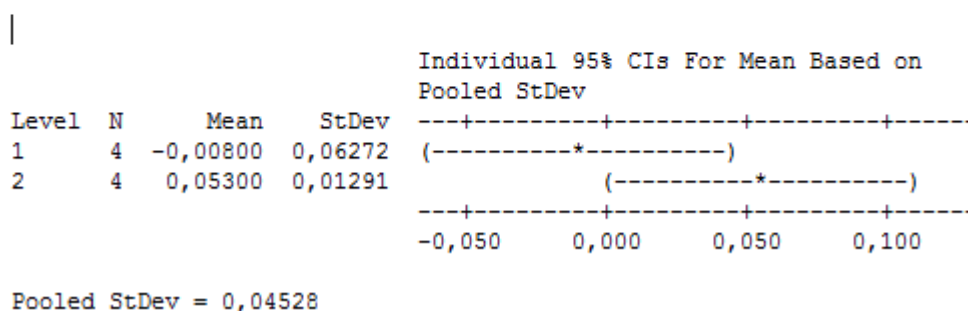
Slika 31 prikazuje rezultate analize varijance za odstupanja mjerenja vanjskog i unutarnjeg promjera od referentnih vrijednosti.

S obzirom na to da P vrijednost iznosi 0,557, tj. veća je od 0,05 ($P > 0,05$) možemo zaključiti da nemamo dovoljno dokaza da odbacimo nultu hipotezu (H_0) te iz toga proizlazi da se odstupanja značajno ne razlikuju i odstupanja proglašavamo statistički neznačajnim. U slučaju da je P vrijednost manja od 0,05 ($P < 0,05$) nultu hipotezu bi odbacili, a odstupanja bi proglasili statistički značajnima.

One-way ANOVA: C5 versus C6

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|--------|----|---------|---------|------|-------|
| C6 | 1 | 0,00744 | 0,00744 | 3,63 | 0,105 |
| Error | 6 | 0,01230 | 0,00205 | | |
| Total | 7 | 0,01974 | | | |

S = 0,04528 R-Sq = 37,70% R-Sq(adj) = 27,31%



Slika 32. Usporedba odstupanja duljine i paralelnosti

Slika 32 prikazuje rezultate analize varijance za odstupanja mjerenja duljine i paralelnosti.

Za usporedbu odstupanja između duljine i paralelnosti ponovno je potrebno postaviti statističke hipoteze.

$$\begin{aligned} H_0: \Delta \bar{x}_3 &= \Delta \bar{x}_4 \\ H_1: \Delta \bar{x}_3 &\neq \Delta \bar{x}_4 \end{aligned} \quad (9)$$

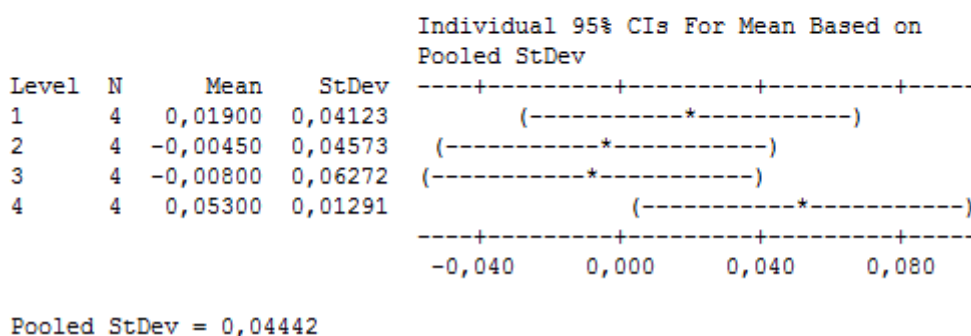
Razina značajnosti ponovo iznosi $\alpha = 0,05$.

S obzirom na to da je P vrijednost veća od 0,05 ($P = 0,105$) nemamo dovoljno dokaza da odbacimo nultu hipotezu (H_0) te iz toga proizlazi da se odstupanja između duljine i paralelnosti značajno ne razlikuju i odstupanja proglašavamo statistički neznačajnim. U ovom slučaju je P vrijednost znatno manja nego u prethodnom. Niža P vrijednost znači više dokaza protiv nulte hipoteze.

One-way ANOVA: C10 versus C11

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|--------|----|---------|---------|------|-------|
| C11 | 3 | 0,00948 | 0,00316 | 1,60 | 0,241 |
| Error | 12 | 0,02367 | 0,00197 | | |
| Total | 15 | 0,03315 | | | |

S = 0,04442 R-Sq = 28,59% R-Sq(adj) = 10,73%



Slika 33. Usporedba odstupanja sve četiri značajke

Slika 33 prikazuje rezultate analize varijance za odstupanja vanjskog i unutarnjeg promjera, duljine i paralelnosti. S grafa na slici je vidljivo da tu nema značajne razlike odstupanja, odnosno da ima dovoljno preklapanja.

U ovom slučaju za sve četiri značajke cilindra analiza je napravljena bez uzimanja u obzir zadnje dvije metode prilagodbe modela jer se one ne mogu koristiti za mjerenje duljine i paralelnosti. Prema tome za svaku značajku imamo po četiri podatka odstupanja.

Ponovo se postavljaju statističke hipoteze kao polazna osnova na kojoj se temelji izračun statističkog testa.

$$\begin{aligned} H_0: \Delta \bar{x}_1 &= \Delta \bar{x}_2 = \Delta \bar{x}_3 = \Delta \bar{x}_4 \\ H_1: \Delta \bar{x}_1 &\neq \Delta \bar{x}_2 \neq \Delta \bar{x}_3 \neq \Delta \bar{x}_4 \end{aligned} \quad (10)$$

Razina značajnosti iznosi $\alpha = 0,05$.

P vrijednost je veća od 0,05 ($P = 0,241$) pa nemamo dovoljno dokaza da odbacimo nultu hipotezu (H_0) te iz toga proizlazi da se odstupanja između svih značajki značajno ne razlikuju i odstupanja proglašavamo statistički neznačajnim. Niti ovdje nema značajne razlike između odstupanja. Stoga se može reći da ćemo očekivati upravo tolika odstupanja od stvarnog rezultata.

7.4.3. Sustavni pomak

Za određivanje sustavnog pomaka potrebno je izračunati aritmetičku sredinu rezultata mjerenja za svaku pojedinu značajku cilindra. Analitička sredina se računa kao omjer svih vrijednosti rezultata mjerenja u nekom skupu i ukupnog broja mjerenja. Također je izračunata i standardna devijacija. Standardna devijacija pokazuje koliko dobro aritmetička sredina reprezentira rezultate iz kojih je dobivena. Veća standardna devijacija označava veće raspršenje rezultata

Tablica 7. Izračun aritmetičke sredine i standardne devijacije

| | \varnothing_u , mm | \varnothing_v , mm | l , mm | //, mm |
|---------------------------------------|----------------------|----------------------|----------|--------|
| Gaussova metoda | 12,04 | 20,09 | 20,09 | 0,07 |
| Chebysheva metoda | 12,04 | 20,09 | 20,06 | 0,05 |
| Metoda najmanje unutarnje kružne zone | 12,10 | 20,05 | 19,99 | 0,06 |
| Metoda najmanje vanjske kružne zone | 12,00 | 20,16 | 20,14 | 0,08 |
| Metoda najmanje opisane kružnice | 12,08 | 20,16 | - | - |
| Metoda najveće upisane kružnice | 11,99 | 20,06 | - | - |
| \bar{x}_i | 12,042 | 20,102 | 20,070 | 0,065 |
| s_i | 0,043 | 0,048 | 0,063 | 0,013 |

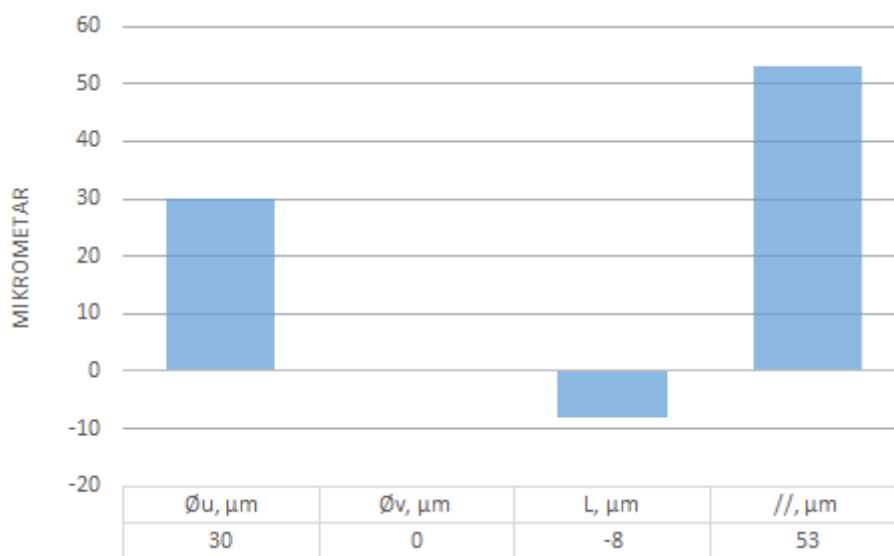
S obzirom na vrijednosti standardne devijacije može se zaključiti da je najveće raspršenje rezultata od aritmetičke sredine pri mjerenju duljine cilindra, a najmanje pri mjerenju paralelnosti.

Na temelju dobivenih aritmetičkih sredina i referentnih vrijednosti značajki cilindra moguće je odrediti sustavni pomak. Sustavni pomak se dobiva usporedbom aritmetičke sredine izmjerenih rezultata i referentnih vrijednosti značajki cilindra. Odstupanje se u ovim slučajevima dobiva kao razlika izmjerene i referentne vrijednosti. Na temelju toga može se odrediti koliko su rezultati mjerenja pomaknuti od referentne vrijednosti u pozitivnom ili negativnom smjeru.

Tablica 8. Aritmetičke i referente vrijednosti

| | \varnothing_u , mm | \varnothing_v , mm | l , mm | //, mm |
|--|----------------------|----------------------|----------|--------|
| \bar{x}_i | 12,042 | 20,102 | 20,070 | 0,065 |
| x_{ref} | 12,012 | 20,102 | 20,078 | 0,012 |
| ODSTUPANJE | 0,030 | 0 | -0,008 | 0,053 |
| Napomena: Odstupanje = $\bar{x}_i - x_{ref}$ | | | | |

Tablica 8 prikazuje odstupanje izmjerene vrijednosti u odnosu na referentnu vrijednost. Najveće odstupanje iznosi 53 μm kod mjerenja paralelnosti, dok je najmanje kod mjerenja duljine i iznosi 8 μm . Kod mjerenja unutarnjeg promjera odstupanje iznosi 30 μm , a kod vanjskog promjera nema razlike između izmjerene i referentne vrijednosti.



Slika 34. Iznos odstupanja u mikrometrima

Slika 34 prikazuje iznos odstupanja u mikrometrima. Iz slike je vidljivo kako su rezultati mjerenja unutarnjeg promjera i paralelnosti zamaknuti prema gore, kod vanjskog promjera nema odstupanja, dok kod mjerenja duljine rezultat je zamaknut prema dolje u odnosu na referentnu vrijednost.

8. ZAKLJUČAK

Iako računalna tomografija danas glasi kao najmoćnija tehnologija za potrebe industrijskih mjerenja, ona je i dalje dosta nepoznata u smislu osiguranja sljedivosti rezultata mjerenja. Kako na rezultate mjerenja na CT uređaju djeluje velik broj utjecajnih faktora, mjerna nesigurnost se ne može točno definirati pa je zbog toga gotovo nemoguće osigurati sljedivost rezultata mjerenja do vrha hijerarhije umjeravanja, odnosno do definicije mjerne jedinice metra. U radu su analizirane različite metode prilagodbe modela pri dimenzionalnom mjerenju duljine, paralelnosti, te vanjskog i unutarnjeg promjera cilindra. Kako se svaka metoda temelji na različitim matematičkim postupcima, odnosno koristi različite algoritme za aproksimaciju funkcije koja najbolje opisuje dodijeljene točke, tako se i rezultati specifičnih mjerenja dimenzija i značajki cilindra značajno razlikuju. Tako npr. pri mjerenju duljine cilindra raspon rezultata mjerenja iznosi 150 μm samo zbog primjene različite metode prilagodbe modela. Kako još ne postoje norme koje kažu da se za mjerenje duljine mora koristiti točno određena metoda da bi rasipanje rezultata bilo minimalno, i dalje će se pojavljivati ovako veliki rasponi rezultata mjerenja. Analizom varijance različitih skupina rezultata mjerenja (vanjskog i unutarnjeg promjera, duljine, paralelnosti) može se zaključiti da se odstupanja između svih skupina značajno ne razlikuju i odstupanja možemo proglasiti statistički neznačajnima. Osim toga, usporedbom srednje izmjerene i referentne vrijednosti moguće je odrediti sustavni pomak mjerenja. Najveći sustavni pomak je pozitivan i pojavljuje se kod mjerenja paralelnosti, dok je kod mjerenja duljine sustavni pomak negativan. Na kraju se prema svemu navedenom može zaključiti da računalna tomografija uz sve prednosti koje nudi, ipak ne daje rezultate mjerenja na koje se možemo osloniti zbog prevelikog broja utjecajnih faktora koji na njih utječu.

LITERATURA

- [1] Noel, J.: Advantages of CT in 3D Scanning of Industrial Parts
- [2] Kruth, J.P.; Bartscher, M.; Caramignato, S.; Schmitt, R.; De Chiffre, L.; Weckenmann, A.: Computed tomography for dimensional metrology, 2011.
- [3] Garrett, W. R.; Splettstosser, H. R.; Titus, D. E.: Radiography in Modern Industry
- [4] http://mynasadata.larc.nasa.gov/images/EM_Spectrum3-new.jpg
- [5] Cantatore, A.; Muller, P.: Indroduction to computed tomography, 2011.
- [6] http://photos1.blogger.com/blogger/2836/1845/1600/X-ray_Tube.jpg
- [7] Christoph, R.; Joachim Neumann, H.: X-ray Tomography in Industrial Metrology, 2011.
- [8] http://www.mdtmag.com/sites/mdtmag.com/files/legacyimages/MDT/Articles/2010/07/principle_1.JPG
- [9] http://topmetrology.ro/produse/92-thickbox_default/nikon-xt-h-225-industrial-ct-scanning.jpg
- [10] http://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/?tx_contagged%5Bsource%5D=default&tx_contagged%5Buid%5D=4727&cHash=52d8c3e73e42fa33d41bdcd1d1790443
- [11] http://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_computed_tomography
- [12] <http://www.cnde.iastate.edu/sites/default/files/resize/xray/simct/xray%20equip%20graphic-600x482.png>
- [13] http://www.phoenix-xray.com/en/company/technology/principles_of_operation/principle_025.html
- [14] https://www.researchgate.net/profile/Richard_Leach2/publication/262938229/figure/fig3/AS:296469207764998@1447695175326/Figure-4-Typical-X-ray-spectra-a-Bremsstrahlung-radiation-b-characteristic.png
- [15] Međunarodni mjeriteljski rječnik - Osnovni i opći pojmovi i pridruženi nazivi (VIM)
- [16] Horvatić, Amalija; Runje, Biserka; Bošnjaković, Alen: Osiguranje sljedivosti kod primjene računalne tomografije u dimenzionalnom mjeriteljstvu, 2015.
- [17] <http://threedpro.server289.com/wp-content/uploads/assembly004.jpg>
- [18] Muller, Pavel: Influence parameters in CT scanning, 2011.
- [19] <http://www.directindustry.com/prod/nikon-metrology/product-21023-447264.html>

- [20] [http://www.nikonmetrology.com/en_EU/Products/X-ray-and-CT-Inspection/Computed-Tomography/XT-H-225-Industrial-CT-Scanning/\(brochure\)](http://www.nikonmetrology.com/en_EU/Products/X-ray-and-CT-Inspection/Computed-Tomography/XT-H-225-Industrial-CT-Scanning/(brochure))
- [21] [http://www.nikonmetrology.com/en_EU/Products/X-ray-and-CT-Inspection/Computed-Tomography/XT-H-225-Industrial-CT-Scanning/\(specifications\)](http://www.nikonmetrology.com/en_EU/Products/X-ray-and-CT-Inspection/Computed-Tomography/XT-H-225-Industrial-CT-Scanning/(specifications))
- [22] VGStudio MAX 2.2, Reference Manual
- [23] Nikolić, Boris: Utjecaj koordinatnog sustava predmeta mjerenja na razinu točnosti mjernog robota, 2015.
- [24] Sui, Wentao; Zhang, Dan: Four methods for Roundness Evaluation, 2012.
- [25] Runje, Biserka: Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja, 2016.
- [26] Runje, Biserka: Predavanja iz kolegija Statistika u mjeriteljstvu, 2016.
- [27] <http://www.statistickeanalize.com/statisti269ki-pojmovnik.html>

PRILOZI

I. CD-R disc